

21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

激光技术与光纤通信实验

周建华 兰 岚 主编





21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

激光技术与光纤通信实验

主　编　周建华　兰　岚



内 容 简 介

本书由“激光原理与技术实验”和“光纤通信实验”两部分组成。实验内容与“激光原理与技术”“光纤通信”等课程的教学大纲和要求保持一致。第一篇为激光原理与技术实验，内容包含 He-Ne 激光器的增益系数、模式分析、光束质量分析实验，Nd:YAG 激光器的电光调 Q、声光调 Q、被动调 Q 技术实验，声光锁模技术实验，此外还有激光技术应用方面的实验，如激光相位测距实验、四象限探测器及光电定向实验、单光子计数实验等。第二篇为光纤通信实验，内容涵盖光纤的结构、损耗和色散、半导体光源、半导体光电探测器、光无源器件、光波分复用技术、光纤通信系统等内容。每个实验项目内容包含了对相关的基础理论和原理以及重要仪器的介绍。电子科技大学光电信息学院的光电信息科学与工程专业已经对这些实验进行了多年的教学实践，使其具有一定的参考价值。

本书适合作为光电信息科学与工程、光电子技术、电子与通信工程等专业的激光原理与技术和光纤通信实验相关的教学用书，也可作为从事相关方向的工程技术人员的快速入门的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

激光技术与光纤通信实验/周建华，兰岚主编. —北京：北京大学出版社，2015.12

（21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材）

ISBN 978-7-301-26609-0

Ⅰ. ①激… Ⅱ. ①周…②兰… Ⅲ. ①激光技术—实验—高等学校—教材②光纤通信—实验—高等学校—教材 Ⅳ. ①TN2-33②TN929.11-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 293415 号

书　　名　激光技术与光纤通信实验
　　　　　Jiguang Jishu yu Guangxian Tongxin Shiyan
著作责任者　周建华　兰　岚　主编
责 任 编 辑　郑　双
标 准 书 号　ISBN 978-7-301-26609-0
出 版 发 行　北京大学出版社
地　　址　北京市海淀区成府路 205 号　100871
网　　址　http://www.pup.cn　新浪微博：@北京大学出版社
电 子 信 箱　pup_6@163.com
电　　话　邮购部 62752015　发行部 62750672　编辑部 62750667
印 刷 者
经 销 者　新华书店
　　　　　787 毫米×1092 毫米　16 开本　11.75 印张　269 千字
　　　　　2015 年 12 月第 1 版　　2015 年 12 月第 1 次印刷
定　　价　28.00 元

前　　言

本书是电子科技大学新编特色教材和专业教材之一，是基于对专业实验教学大纲的多次修订和在多年教学实践中的实际教学经验积累的基础上编写而成的。

激光是 20 世纪的重大发明之一，由于激光器具有方向性好、亮度高、单色性和相干性好等优点，它在工业、军事、通信、医学和科学研究等方面都发挥了独特作用。而光纤通信技术自 20 世纪 80 年代以来在全世界得到广泛应用，具有低损耗和高带宽的特点，可实现信息网络化需要的海量信息高速传输，成为了推动信息社会进步的重要技术力量。随着激光与光纤通信技术相关信息产业的迅猛发展，在科学研究和人才需求的牵引下很多高校开设了“激光原理与技术”和“光纤通信”等专业核心课程。学生在理论学习的同时，必须通过实验来进一步掌握基本原理、概念和技术，培养学生的实验技能和综合科学研究能力，满足 21 世纪社会对人才创新能力的需求。

本书力求通过主要概念和关键性实验技术来阐述激光与光纤通信技术的基本原理和应用技能。从教学角度出发，本书将重点放在关键性基础理论和原理内容上，每个实验项目都提供了相关的理论背景和基础原理的介绍，基本涵盖了激光与光纤通信技术的重要知识点。通过对本书的学习，学生一方面能掌握基础理论知识，另一方面能通过实验掌握激光与光纤通信技术的实践知识和技能。

为了方便学生了解实验具体情况，本书大部分实验配备了视频讲解，可以通过微信扫一扫对应的二维码进行观看。

本书由电子科技大学周建华和兰岚共同编写。编写过程中，参考了相关教材、书籍和资料，在此表示感谢。此外，感谢电子科技大学相关领导和老师的支持与帮助。

由于时间和编者水平有限，书中难免会存在一些不足之处，恳请广大读者批评指正。

编　者

2015 年 3 月

目　　录

第一篇　激光原理与技术实验

第二篇　光纤通信实验

第一篇　激光原理与技术实验

实验 1

He-Ne 激光器的组装调试及其增益系数的测量

一、实验目的



(1) 掌握 He-Ne 激光器的结构、特性和工作原理。
(2) 掌握激光谐振腔理论。
(3) 了解半内腔 He-Ne 激光器光路调整的原理和技巧。
(4) 了解激光增益系数的测量方法。

二、实验内容

(1) 组装调试半内腔 He-Ne 激光器，调整光路，使半内腔 He-Ne 激光器的谐振腔(全反镜和半反镜)满足激光起振条件，产生激光。
(2) 微调半内腔 He-Ne 激光器的半反镜的方位，使激光输出最强。
(3) 测量激光器在不同腔长时的最大输出功率，从而测出激光输出与腔长的关系。
(4) 测量半内腔 He-Ne 激光器的增益系数。

三、实验原理

(一) He-Ne(氦氖)激光器结构与工作原理

He-Ne 激光器是最早研究成功的气体激光器之一。He-Ne 激光以它的模式好、相干性好、结构简单、体积小、价格低廉、使用方便等优点，使它在准直、定位、全息照相、测量等方面得到了广泛使用。He-Ne 激光器是原子气体激光器(此外还有分子气体激光器如二氧化碳 CO_2 激光器，离子气体激光器如氩离子 Ar^+激光器)。

从 He-Ne 激光器结构上看，主要由放电管、电极和光学谐振腔组成。主要有内腔式、半内腔式和外腔式激光器，其结构示意图如图 1-1.1 所示。

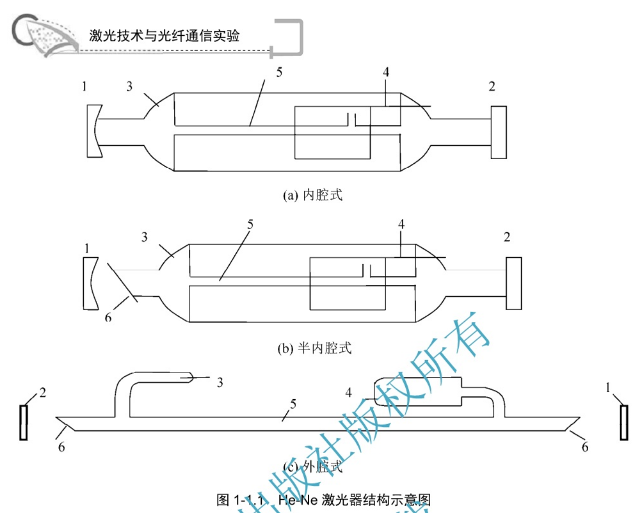


图 1-1.1 He-Ne 激光器结构示意图

1—全反镜；2—输出镜；3—阳极；4—阴极；5—放电管；6—布儒斯特窗

(1) 内腔式：谐振腔的反射镜与放电管连在一起。

(2) 半内腔式：谐振腔的一个反射镜与放电管连在一起，另一个反射镜与放电管分开。

(3) 外腔式：谐振腔的反射镜与放电管分离。

本实验采用的是半内腔式 He-Ne 激光器。

外腔式和半内腔式激光器中，放电管的两端或一端用光学玻璃封接，窗片的法线与放电管管轴的夹角 θ 满足

$$\tan\theta = n_c \tag{1-1.1}$$

该窗片称为布儒斯特窗(n_c 为窗片的折射率)，它的作用除了对放电管工作气体起密封作用外，还使激光输出为线偏振光，并减少光束在腔内来回传播过程中在窗玻璃上发生的反射损失。

放电管通常用热膨胀系数小的玻璃做成，如石英玻璃，放电管中心的毛细管就是激光振荡的激活区，放电管的较大外套管主要是为了储气以延长激光的寿命，同时作为毛细管的支撑。电极分阳极和阴极，一般而言，阳极用钨棒制成，阴极为尺寸较大的圆筒，用电子发射率高而溅射率小的铝及其合金薄片制成，然后由钨棒引到管外。He-Ne 激光器的单程增益很低，谐振腔通常为平凹腔，凹面镜为全反镜，平面镜为输出镜，其反射率取 98.5%～99.5%为宜。

He-Ne 激光器的工作气体为 He 气和 Ne 气。产生激光跃迁的是 Ne 气，在可见及红外区域可产生许多条谱线，其中最重要的是 0.6328μm、1.15μm 和 3.39μm 3 条谱线，它们所



对应的能级跃迁分别如下。

0.6328μm ($3S_2 \rightarrow 2P_4$)

1.15μm ($2S_2 \rightarrow 2P_4$)

3.39μm ($3S_2 \rightarrow 3P_4$)

He 气在 He-Ne 激光器中是辅助气体，主要用以提高 Ne 原子的抽运效率。在一定的放电条件下，阴极发散的电子向阳极运动并被电场加速，快速电子与基态的 He 原子发生非弹性碰撞，使 He 原子被激发到激发态 2^1S_0 上而自身减速，由于 He 原子的激发态能级 2^1S_0 与 Ne 原子的激发态能级 3S 很接近，He 原子的激发态能级 2^3S_1 与 Ne 原子的激发态能级 2S 也很接近，因此处于激发的 He 原子通过碰撞将能量传给基态 Ne 原子，使之达到激光上能级，而 He 原子则回到基态，这种激发方式是 Ne 原子获得粒子数反转的主要激发机制，而 Ne 原子的直接电子碰撞激发只起很小的作用，如图 1-1.2 所示。

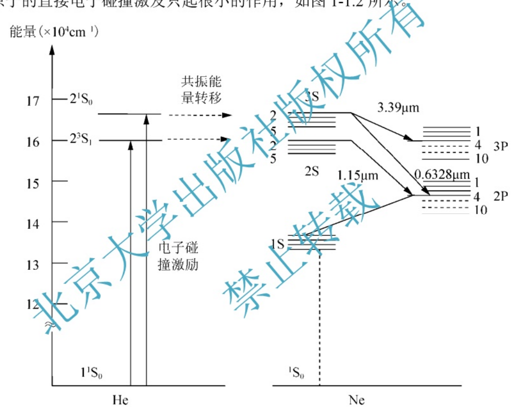


图 1-1.2　He 原子和 Ne 原子的能级图

要产生 He-Ne 激光，除了要有工作物质以外，还需要稳定的光学谐振腔，即全反镜和半反镜的中心法线必须与毛细管重合。此外，光学谐振腔的长度会影响激光输出功率的大小。

(二) 可变输出镜法测量 He-Ne 激光器增益系数的原理

在激光器中，小信号增益系数 g_0，饱和光强 I_s，腔内损耗 α 和输出率 T 等是决定着激光器工作特性的重要参数。所谓小信号增益系数 g_0，是指在腔内光强很弱的情况下，光通过增益介质单位距离后光强增长的百分数。它的大小与激励强弱及介质性质有关。随着腔内光强的增大，增益系数会逐渐减小，这就是饱和效应。饱和效应使腔内光强最终达到一

个稳定值，而该值与饱和光强 I_s 有直接的联系。腔内损耗 α 定义光在腔内往返一次的光学损耗率，它与激光谐振腔的结构参数等有关。当激光器的工作参数确定以后，输出反射镜应选取最佳输出率 T_{opt}，此时有最大的激光输出。

理论分析表明：当 He-Ne 激光管较长时，纵模间隔的宽度会小于由于碰撞加宽等因素引起的均匀加宽宽度，此时其增益饱和可以用均匀加宽方法近似处理，其激光输出功率由式(1-1.2)描述：

$$P_{out} = P_s T\left(\frac{2g_0 L}{\alpha + T} - 1\right) \tag{1-1.2}$$

式中：L 为激活介质的长度；T 为输出率；g_0 为中心频率的小信号增益系数；P_{out} 为激光输出功率；P_s 为饱和功率。

饱和光强 I_s 与饱和功率 P_s 的关系为

$$I_s = \frac{1.26 P_s}{\pi \omega_0^2} \tag{1-1.3}$$

式中：ω_0 为高斯光束的束腰半径。

由式(1-1.2)可以看出，当其他参数不变，改变 T 时，P_{out} 会随之改变。当 T 为最佳输出率 T_{opt} 时，P_{out} 最大。由 $\frac{\mathrm{d}P_{out}}{\mathrm{d}T} = 0$ 得

$$T_{opt} = \sqrt{2g_0 L\alpha} - \alpha \tag{1-1.4}$$

1. 图解法求激光增益

可采用图解法求得腔内损耗、激光增益系数及饱和光强 I_s 等。由式(1-1.2)得

$$T^2 - \left(2g_0 L - \alpha - \frac{P_{out}}{P_s}\right)T + \frac{P_{out} \cdot \alpha}{P_s} = 0 \tag{1-1.5}$$

这是一个关于 T 的一元二次方程，可解得两根 T_1 和 T_2。由根与系数的关系可得

$$T_1 + T_2 = 2g_0 L - \alpha - \frac{P_{out}}{P_s} \tag{1-1.6}$$

$$T_1 \cdot T_2 = \frac{P_{out} \cdot \alpha}{P_s} \tag{1-1.7}$$

再由式(1-1.6)和式(1-1.7)连解，得

$$T_1 \cdot T_2 + \alpha(T_1 + T_2) - \alpha(2g_0 L - \alpha) = 0 \tag{1-1.8a}$$

或

$$(T_1 + T_2) + \frac{1}{\alpha} T_1 \cdot T_2 - (2g_0 L - \alpha) = 0 \tag{1-1.8b}$$

可以看出，式(1-1.8)是关于 $(T_1 + T_2)$ 与 $(T_1 \cdot T_2)$ 的直线方程。因此用 $(T_1 + T_2)$ 对 $(T_1 \cdot T_2)$ 作图(图 1-1.3)，从直线斜率可决定损耗 α，由直线截距可以求出增益系数 g_0。

如图 1-1.3 所示，设 $(T_1 + T_2) \sim (T_1 \cdot T_2)$ 直线的横坐标、纵坐标截距分别是 A_1、B_1，则

$$\alpha = A_1 / B_1 \tag{1-1.9}$$



令 $T_1 \cdot T_2 = 0$，得 $(T_1 + T_2)$ 轴上的截距为 $(2g_0L - \alpha) = B_1$，则

$$g_0 = \frac{1}{2L}\left(B_1 + \frac{A_1}{B_1}\right) \tag{1-1.10}$$

从式(1-1.7)还可得到：

$$P_{\text{out}} = \left(\frac{P_{\text{s}}}{\alpha}\right) T_1 \cdot T_2 \tag{1-1.11}$$

用 P_{out} 对 $(T_1 \cdot T_2)$ 作图，从直线斜率可得到饱和功率 P_{s}，设 $P_{\text{out}} \sim (T_1 \cdot T_2)$ 直线的斜率为 K，则

$$P_{\text{s}} = \alpha \cdot K = \frac{A_1}{B_1} K \tag{1-1.12}$$

再根据式(1-1.3)便可得到饱和光强 I_{s}。

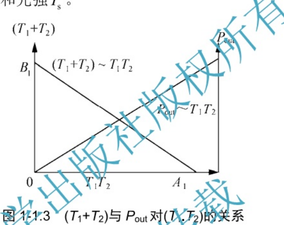


图 1-1.3　(T_1+T_2)与 P_{out} 对$(T_1 \cdot T_2)$的关系

2. 可变输出率法求激光增益

在半内腔式 He-Ne 激光器内放一玻璃平板分光片 PS，如图 1-1.4 所示。该分光片与谐振腔轴线成某交角 ϕ。在满足振荡条件时，分光片两边有一定功率的激光输出。

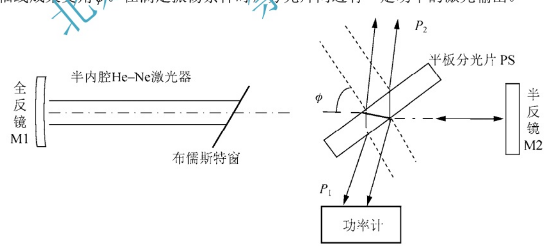


图 1-1.4　可变输出镜法测量 He–Ne 激光器增益系数的原理图

分光片单个表面对光的反射率 R_ϕ 是入射角 ϕ 的函数。由菲涅尔公式得到

$$R_{\phi}=\frac{\tan^{2}\left[\phi-\arcsin\left(\frac{\sin\phi}{n}\right)\right]}{\tan^{2}\left[\phi+\arcsin\left(\frac{\sin\phi}{n}\right)\right]} \tag{1-1.13}$$

实验中所用的平板分光片材料为K_1玻璃， 对激光的折射率$n=1.52$。

不考虑分光片本身的吸收和散射，且在较大入射角的斜入情况下，平行平面玻璃两个面之间将产生激光的多次反射和透射，如图 1-1.5 所示，总反射系数为

$$\begin{aligned}R_{\text{Total}}&=R_{\phi}+R_{\phi}(1-R_{\phi})^{2}+R_{\phi}^{3}(1-R_{\phi})^{2}+R_{\phi}^{5}(1-R_{\phi})^{2}+R_{\phi}^{7}(1-R_{\phi})^{2}+\cdots\\&=2R_{\phi}\left(1-R_{\phi}+R_{\phi}^{2}-R_{\phi}^{3}+R_{\phi}^{4}+\cdots\right)\\&=\frac{2R_{\phi}}{1+R_{\phi}}\end{aligned} \tag{1-1.14}$$

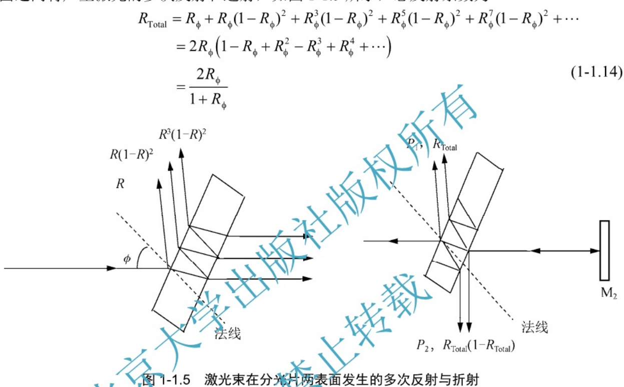


图 1-1.5　激光束在分光片两表面发生的多次反射与折射

激光在腔内往返一次，在分光片两表面反射的光强与入射光强之比称为分光片的输出率T_{ϕ}，即

$$\begin{aligned}T_{\phi}&=\left|\ R_{\text{Total}}+R_{\text{Total}}(1-R_{\text{Total}})\ \right|\\&=\frac{4R_{\phi}}{(1+R_{\phi})^{2}}\\&=1-\left(\frac{1-R_{\phi}}{1+R_{\phi}}\right)^{2}\end{aligned} \tag{1-1.15}$$

若旋转平板分光片，使入射角ϕ连续地变化，从而平板分光片对激光的输出率也连续变化，因此该分光片将起一个反射率可变的平面耦合输出镜的作用。

旋转分光片，改变输出率T，使腔内总损耗$(\alpha+T)$增加。定义当激光功率刚刚变为 0 时的输出率为阈值输出率T_{g}。由式(1-1.2)得

$$T_{\text{g}}\cdot P_{\text{s}}\left(\frac{2g_{0}L}{\alpha+T_{\text{g}}}-1\right)=0 \tag{1-1.16}$$

即

$$2g_0L = \alpha + T_g \tag{1-1.17}$$

联解式(1-1.4)和式(1-1.17)，得

$$\alpha = \frac{T_{opt}^{\ 2}}{T_g - 2T_{opt}} \tag{1-1.18}$$

$$2g_0L = \frac{\left(T_g - T_{opt}\right)^2}{T_g - 2T_{opt}} \tag{1-1.19}$$

旋转平面分光片，即可在不同的入射条件下，测量分光片的输出功率值，记录输出功率最大时的入射角，求出最佳输出率 T_{opt}。再测得阈值输出率 T_g，由式(1-1.19)可得到该激光器的增益 $2g_0L$。

四、实验仪器设备

光学实验导轨	半内腔 He-Ne 激光管	LD 激光准直光源
激光管调整架	小孔光阑	激光电源
二维反射镜架	激光功率指示计	分光片

五、实验步骤

1. 半内腔式 He-Ne 激光器的组装与调试

实验装置如图 1-1.6 所示，He-Ne 激光器的一个全反镜与毛细管、储气套等做成一体，并将全反镜与毛细管调至垂直，放置在激光器调整架上，而另一个半反镜则被安装在一个精密二维调整架上，可灵活移动。设备的调试主要是调整 He-Ne 激光器与半反镜的相对位置关系，只有当谐振腔的两个反射镜与激光器毛细管接近垂直时，激光才有可能产生。本实验采用半导体激光器 LD 作为基准，用自准直的方法使激光谐振腔达到谐振条件，产生 He-Ne 激光，其调整过程如下。

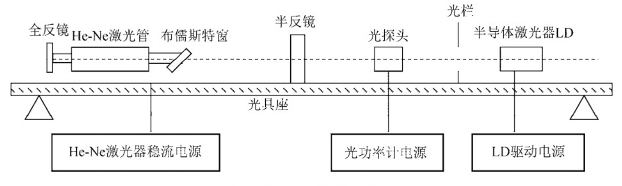


图 1-1.6　实验装置示意图

(1) 打开半导体激光器电源，LD 发出激光。

(2) 松开 He-Ne 激光管调整架上的调整螺钉，使激光管处于自由悬挂状态。

(3) 将小孔光阑靠近 He-Ne 激光器的布儒斯特角，调整小孔光阑的高度，使小孔与布

儒斯特角的中心等高。

(4) 将小孔光阑靠近 LD 激光器，调整 LD 激光的高度和方向，使小孔在 LD 光斑的中心。将小孔光阑在光具座上远离 LD 激光器，调整 LD 的调整架上的两个精密螺钉，改变 LD 激光束的俯仰角和方位角，使小孔光阑在靠近 LD 和远离 LD 处时，其小孔都处在 LD 光斑的中心。此时认为 LD 光平行于光具座，此 LD 光作为基准光，在实验过程中这个基准不再变动。

(5) 调整布儒斯特窗这端的二维调整架，使 LD 光束进入毛细管，这时应在小孔屏上看见从 He-Ne 激光器的另一个反射镜反射回来的光，一般为圆环形。尽量使之明亮。

(6) 调整 He-Ne 激光器全反镜的二维调整架，使小孔屏上的反射光的强度和形状随之变化，(配合调整布儒斯特窗这端的二维调整架)尽量使这个环形光斑变小、变强并成为一个亮点。

(7) 反复调整 He-Ne 激光器前后的两个二维调整架，使反射到小孔屏的那个亮点尽可能对称、明亮并重合于小孔。此时可认为毛细管基本与 LD 激光束(基准光)相重合，全反镜与 LD 激光束垂直。

(8) 将 He-Ne 激光器的半反镜连同二维精密调整架放置在 He-Ne 激光器前的滑块上(离布儒斯特窗 10cm 左右)，调整半反镜的高度使激光大致打在半反镜的中心位置上，锁紧半反镜架。

(9) 反复调整半反镜的两个精密螺钉，使小孔光阑靠近和远离半反镜时，半反镜反射回小孔屏上的光斑落在小孔中心。此时认为半反镜与基准光垂直。

(10) 用脱脂棉和丙酮擦拭布儒斯特窗。

(11) 打开 He-Ne 激光电源，调整电流到 5.5mA 左右，这时应有 He-Ne 激光输出(有一束很细的红光从布儒斯特窗打在半反镜上)。如果没有，请仔细调整半反镜上的两个螺钉，直到有 He-Ne 激光输出为止。

(12) 将功率计探头放入光路，测量 He-Ne 激光器的输出功率，反复仔细调整半反镜上的两个精密调整螺钉，以使输出激光功率达到最大。

2. 腔长与激光功率、横模、束腰、发散角的关系

(1) 用功率指示计测量其最大功率。用显示屏在离输出镜端一定距离处(2～3m)观察光斑的大小和形状。光斑的大小反映了发散角的大小，光斑的形状反映激光的横模。观察半反射镜上的光斑(束腰)大小。

(2) 松开半反射镜架滑块上的螺钉，移动反射镜，以改变谐振腔的腔长和腔型。重复 1 中(9)～(12)中的步骤，重复 2 中的实验和观察，以了解、掌握这些参数的变化规律。

3. 激光增益的测量

利用本实验装置和分光片旋转到阈值输出和最佳输出时所对应的两个输出率 T_g 和 T_{opt}，计算出相关参数。

(1) 将半反射镜放在布儒斯特窗前 10cm 处，调出激光，使得激光功率输出最大，记录此时光功率值 P_1。

(2) 将分光片表面擦净，并把放在旋转平台上的镜片架插入腔内光路，仔细调整激光



谐振腔和分光片，使分光片转轴与激光束和布氏窗法线相垂直，仔细调整旋转台，使激光正好消失(呈忽明忽暗)。此时损耗与激光增益相等，即 $2g_0L = \alpha + T_g$ 。

(3) 连同滑块一起(即保持分光片相对滑块角度位置不变)取下分光片，放置在腔外光路中，测出此时透过分光片激光功率 P_2 。

根据 $T_g = (P_1 - P_2)/P_1$，得到阈值输出率 T_g 。

(4) 在激光谐振腔内旋转平面分光片，测量分光片的输出功率值，记录输出功率最大时的入射角，此时为最佳输出率 T_{opt}，连同滑块一起(即保持分光片相对滑块角度位置不变)取下分光片，放置在腔外光路中，测出此时透过分光片激光功率 P_3 。

根据 $T_{opt} = (P_1 - P_3)/P_1$，得到最佳输出率 T_{opt} 。

再由式(1-1.19)算出激光增益 $2g_0L$ 。

六、注意事项

(1) He-Ne 激光器的驱动电流不能超过允许的最大值(6mA)，否则会损坏激光器和电源。

(2) 绝对避免激光束直射人眼，只能从侧面观察激光散斑。

(3) He-Ne 激光器阳极电压有几千伏，注意不要碰到电极。

(4) 半反镜膜片是非常易损的光学元件，绝对避免用手触、摸、刮。

(5) 布儒斯特窗可用酒精或丙酮擦拭。

七、实验数据与分析(表 1-1.1 和表 1-1.2)

表 1-1.1　不同腔长时测得的最大输出功率

腔长/mm					
输出功率/μW					

表 1-1.2　激光增益测量数据(输出功率单位：μW)

P_1	P_2	T_g	P_3	T_{opt}	$2g_0L$

八、思考题

(1) 用实验中的方法测量激光器增益会带来哪方面的不准确性或者误差(从激光器的损耗来考虑)？若实验条件允许，可以用什么方法改进实验来进一步减小误差？

(2) 将分光片旋转到与激光束相垂直的位置上，并读出转台的角度读数。此时反射镜入射角 Φ=0。注意观察在入射角等于或接近于零时激光强度有什么变化？思考一下为什么会发生这种变化？怎样确定分光片与激光束相垂直的确切位置？

(3) 讨论在垂直入射和近于垂直入射时所观察到的现象并解释之。

(4) 当旋转分光片改变入射角为布氏角 ϕ_B 时，为什么腔内振荡最强，而分光片反射输出接近于零？但又为什么不为零？什么情况下它等于零？

实验 2

He-Ne 激光器的模式分析

一、实验目的

(1) 观察激光器的跳模现象，了解其影响因素。

(2) 观察 He-Ne 激光器的输出频谱。

(3) 掌握共焦球面干涉仪的原理及测量 He-Ne 激光器纵横模的方法。

二、实验内容

(1) 测量并计算 F-P 扫描干涉仪的腔长、自由光谱区以及精细常数。

(2) 用 F-P 扫描干涉仪对 He-Ne 激光器进行模式分析，测量纵模间距和横模间距。

三、实验原理

(一) He-Ne 激光器的模式结构

激光器谐振腔具有不同的谐振模式，即，具有不同的光场分布。激光模式可以分为纵模和横模，它们分别代表纵向光场分布和横向光场分布。通常用模指数(m,n,q)表示不同的模式，m、n为横模指数，当$m=n=0$时为基横模，否则，为高阶横模。q为纵模指数。

激光器谐振腔具有无数个固有的、分立的谐振频率。由无源谐振腔理论得到(m,n,q)模式的频率为

$$\nu_{\text{mnq}}=\frac{c}{2\mu L}\left\{q+\frac{1}{\pi}(m+n+1)\arccos\sqrt{\left(1-\frac{L}{R_1}\right)\left(1-\frac{L}{R_2}\right)}\right\} \tag{1-2.1}$$

式中：μ为介质折射率；c为真空光速；L为腔长；R_1和R_2分别为谐振腔两反射镜的曲率半径。不同阶横模(m，n不同)对应有不同的横向(垂直于谐振腔轴线方向)光强和频率分布，从光斑图样可以了解不同阶横模之间强度分布的差异，如图 1-2.1 所示，但不同阶横模所对应的振荡频率亦有差异，正是利用它来分析横模结构。

不同纵模(即q值不同)，虽对应不同的纵向(沿腔轴线方向)光强分布，但由于不同纵模光强分布差异极小，从光斑图样无法分辨，只能根据不同纵模对应不同频率来分析激光束的纵模结构。

由式(1-2.1)可知，当m，n相同时，即对于同一阶横模，相邻纵模间隔是等间距的，其频率差为

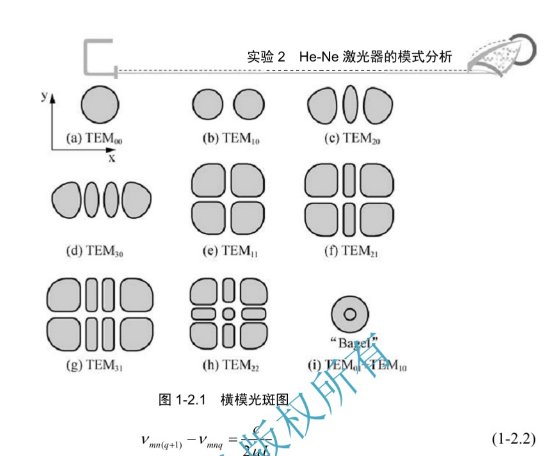


图 1-2.1　横模光斑图

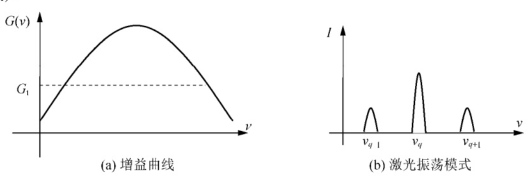
$$\nu_{mn(q+1)} - \nu_{mnq} = \frac{c}{2\mu L} \tag{1-2.2}$$

对于纵模阶次相同的模式，横模模式阶次越高，谐振频率越高，不同阶横模间的频率间隔为

$$\nu_{m'n'q} - \nu_{mnq} = \frac{c}{2\mu L}\left\{(\Delta m + \Delta n)\frac{1}{\pi}\arccos\left[\left(1-\frac{L}{R_1}\right)\left(1-\frac{L}{R_2}\right)\right]\right\} \tag{1-2.3}$$

式中：$\Delta m = m' - m$，$\Delta n = n' - n$。

在激光器内，由于谐振腔的作用，使受激辐射光在腔内来回反射，多次通过激活介质而不断加强。如果单程增益大于单程损耗，即满足激光振荡的阈值条件时，则有稳定的激光输出。由于各种因素可能使谱线加宽，使激光介质的增益系数有一频率分布，如图 1-2.2(a)所示，该曲线称为增益曲线。只有频率落在工作物质增益曲线范围内且满足激光器阈值条件的那些模式才能形成激光，如图 1-2.2(b)所示。如果不采取选模措施，一般情况下，He-Ne 激光器以多模方式工作。例如 300mm 的 He-Ne 激光器的输出光中可以出现 3 个频率(ν_{q-1}，ν_q，ν_{q+1})。



(a) 增益曲线　　(b) 激光振荡模式

图 1-2.2　He-Ne 激光器的振荡模式示意图



(二) 用 F-P 法布里-珀罗共焦球面扫描干涉仪测量激光模式原理

由谐振腔理论知，不同模式(横模或纵模)各自有不同的频率谱，因此可通过分析激光器的频谱结构来判断激光器的振荡模式。

本实验采用共焦球面扫描干涉仪测量 He-Ne 激光器的频谱，但是只能测出激光器各谱线的频率差，并不能直接测出 m、n、q 的值。

F-P 法布里-珀罗共焦球面扫描干涉仪的结构如图 1-2.3 所示。它主要由两片曲率半径相等的反射镜、一个压电陶瓷和一台锯齿波驱动器组成。这两片反射镜相对放置，间距 L 等于反射镜的半径 R，从而形成共焦谐振球面腔，其中一块反射镜固定不动，另一块反射镜固定在压电陶瓷上。被检测光束沿着谐振腔的光轴方向入射到谐振腔内，在此谐振腔内往返传播多次，每次被反射时，都有一小部分光经过出射镜透射而逸出谐振腔，多次逸出的光发生多光干涉，只有波长满足 $k\lambda = 4\mu L$ (k 为整数)的激光从谐振腔出射时，多束光才能发生相长干涉，即透过此谐振腔，在光电二极管上形成大的电信号，送到示波器的 y 轴输入端，改变加在压电陶瓷上的电压，可改变压电陶瓷的长度(约波长量级)，改变谐振腔的腔长，从而使得被测光束中的每一个不同频率的光先后透过干涉仪，在示波器上显示的波形就代表被测光束的光谱。如果用锯齿波电压信号加在压电陶瓷上，则干涉仪的腔长将在原腔长 L 的基础上做连续的周期性变化，透射光波长也将产生相应的连续变化，在示波器上周期性地显示频谱的相关波形。

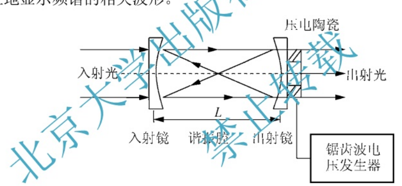


图 1-2.3 F-P 共焦球面扫描干涉仪

F-P 共焦球面扫描干涉仪有以下性能指标。

1. 自由光谱区 $\Delta\nu_F$

由 $4\mu L = k\lambda$ (介质是空气，μ=1)可知，当腔长变化 $\lambda/4$ 时，波长 λ 的模可再次透过干涉仪。通常把腔长改变 $\lambda/4$ 所对应的频率变化量 $\Delta\nu_F = c/4L$ ($\Delta\lambda = \lambda^2/4L$)称为干涉仪的自由光谱区。

或者说，它表示扫描干涉仪的腔长变化 1/4 相邻透射峰的波长差时所对应的透射波长或频率的变化量。它决定了扫描干涉仪能够测量的不发生干涉级次重叠的最大频率差。

$$\Delta\nu_F = \frac{c}{4\mu L} \quad 或\ \Delta\lambda_F = \frac{\lambda^2}{4\mu L} \tag{1-2.4}$$

注：本实验中，扫描干涉仪自由光谱区范围已标定：$\Delta\nu_F = 3\text{GHz}$。

2. 仪器带宽 δv

仪器带宽 δv 是指干涉仪透射峰的频率宽度，也就是干涉仪能分辨的最小频差。通常，反射镜的反射率越高，调整精度越高，腔内损耗越小，则带宽越窄。

3. 有效精细常数 N

有效精细常数 N 是用来表征扫描干涉仪分辨本领的参数。它的定义是：自由光谱区与最小分辨率极限宽度之比。即，在自由光谱区内能分辨的最多的谱线数目。根据精细常数的定义得

$$N = \frac{\Delta v_F}{\delta v} \tag{1-2.5}$$

四、实验仪器设备

半内腔 He-Ne 激光管及其驱动电源　　光学导轨　　激光管调整架
内腔式 He-Ne 激光器及其驱动电源　　F-P 共焦球面扫描干涉仪　　锯齿波发生器
光电接收器　　示波器　　小孔光阑

五、实验步骤

1. 内腔式 He-Ne 激光器的模式分析

(1) 按图 1-2.4 连接设备。

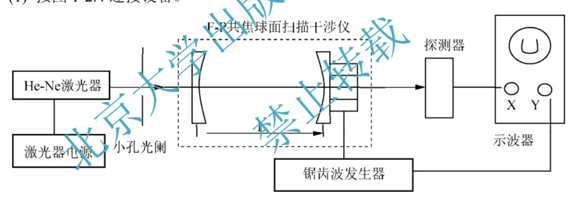


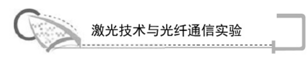
图 1-2.4　实验装置图

(2) 接通 He-Ne 激光器电源使激光器工作，进行激光器与 F-P 共焦球面扫描干涉仪的初步准直工作。

具体步骤如下。

开启 He-Ne 激光器，锯齿波发生器和示波器的电源，让示波器与锯齿波扫描同步。先使激光束从小孔光阑通过，调整扫描干涉仪上下左右位置，使光束正入射孔中心，在小孔光阑背面可以观察到一大一小的两个反射光斑，使小光斑反射到光阑小孔的正上方，小孔位于大光斑中心，这时表明入射光束和扫描干涉仪的光轴基本重合。

改变锯齿波电压的幅度，观察示波器上显示的频谱变化情况，弄清干涉仪自由光谱区对应的范围。选择合适的锯齿波电压和示波器 x 轴、y 轴放大率，使示波器上显示出激光器的完整频谱，细调干涉仪的位置和方位，使谱线尽量强，谱线最细，波形示意图如图 1-2.5



所示。

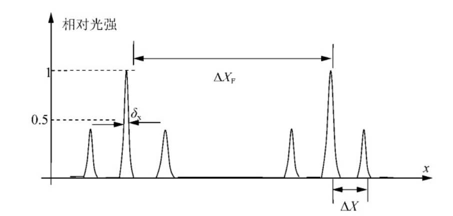


图 1-2.5　示波器中观察到的各纵模的波形示意图

(3) 已知扫描干涉仪的自由光谱范围 $\Delta\nu_F = 3\text{GHz}$。

(4) 通过示波器可以测量出 ΔX_F，它正比自由光谱区 $\Delta\nu_F$。

(5) 再用示波器分别测出单个波形的半高宽度 δx 和相邻纵模之间的间距 ΔX，计算出干涉仪的有效精细常数 N $\left(N = \dfrac{\Delta X_F}{\delta x}\right)$ 和相邻纵模之间的频率间距 $\Delta\nu_q = \Delta\nu_F \cdot \dfrac{\Delta X}{\Delta X_F}$ 实验结果填入表 1-2.1 中。

2. 半内腔 He-Ne 激光器的模式分析

(1) 对第一篇实验 1 中的半内腔 He-Ne 激光器，改变腔长，用 F-P 扫描干涉仪观察它的模式变化情况，并测量相邻纵模的间距。

(2) 用吹风的方法观察模谱频率的漂移和“跳模”现象，并解释其原因。

(3) 实验结束后，分别关闭 He-Ne 激光器、锯齿波驱动器和示波器的电源即可。

六、注意事项

(1) 测量激光器的光谱时，由于扫描干涉仪的反射光的反馈可能影响激光器光谱线的稳定性，因此在激光器的输出光不太弱时，干涉仪应放在距离激光器较远的位置，如 30cm 处。

(2) 对锯齿波驱动器输出波形“前后沿”的调整影响其他参数调整，因此可以先调整前后沿，然后再调整其他参数。

(3) 工作频率过高会影响锯齿波波形，可以先把“频率”旋钮调到最小，然后逐渐提高工作频率，直到得到所需频率。

七、实验数据与分析

表 1-2.1　实验数据　(已知扫描干涉仪的自由光谱范围 $\Delta\nu_F = 3\text{GHz}$。)

示波器读数			计算	
ΔX_F	δ_x	ΔX	有效精细常数 N	纵模间距 $\Delta\nu_F$

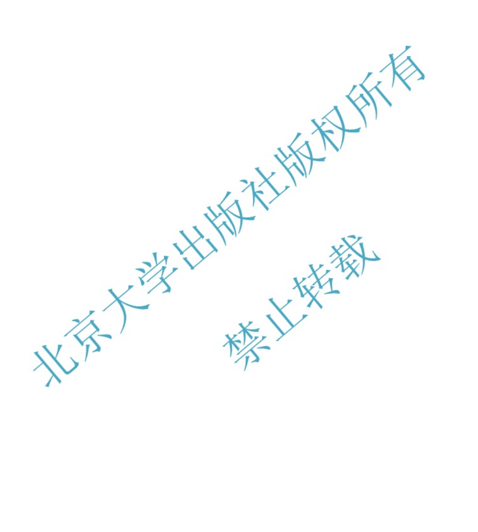


八、思考题

(1) 实验中，为什么说“一大一小的两个反射光斑，使小光斑回到光阑小孔的正上方，小孔位于大光斑中心，这时表明入射光束和扫描干涉仪的光轴基本重合”？

(2) 对半内腔 He-Ne 激光器轻轻扇风，便可观察频率漂移现象。试说明其原因，并估算漂移的数量级。(玻璃膨胀系数为 $70\times10^{-7}/℃$)

(3) 为什么扫描干涉仪的自由光谱区应大于待测激光器的荧光线宽？增大扫描干涉仪的锯齿波驱动电压是否可以增大自由光谱区？增大锯齿波电压时，示波器上显示的模谱图如何变化？



实验 3

He-Ne 激光束质量分析与参数测量

一、实验目的

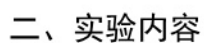
(1) 了解高斯光束的特点和它的特征参数。

(2) 掌握 He-Ne 激光器的远场发散角的测量方法。

(3) 加强对开放光学谐振腔模式理论的理解。

(4) 了解气体激光器与半导体激光器的光斑模式的区别。

(5) 了解 CCD 器件的应用。



二、实验内容

(1) 搭建实验系统，调整光路。

(2) 用 CCD 相机和相关测量软件测量 He-Ne 激光器输出光束在离光源输出口不同距离处的光斑半径。

(3) 用 MATLAB 编程计算 He-Ne 激光器输出光束的束腰半径和发散角。

三、实验原理

稳定球面腔激光器输出及在腔内振荡的基横模光束，在其横截面内，光强是按高斯函数形式分布的，故称为高斯光束，光斑半径和远场发散角是高斯光束的基本参数。

在制导及精密测量等应用中，要求激光器输出高斯光束的远场发散角小，具有很好的方向性和准直性。

(一) 基模高斯光束的特征参数

共焦球面腔的基模高斯光束，沿 z 轴方向传播，其电场矢量可表示为

$$E_0(x,y,z)=\frac{A_0}{\omega(z)}\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}\right)\exp\left\{-ik\left(z+\frac{x^2+y^2}{2R(z)}\right)+i\varphi(z)\right\} \tag{1-3.1}$$

式中：$\omega(z)$ 是高斯光束在 z 处的光斑半径；$R(z)$ 是高斯光束在 z 处等相位面的曲率半径；$\varphi(z)$ 是高斯光束在 z 处等相位面的位相因子。$\frac{A_0}{\omega(z)}\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}\right)$ 代表点 (x,y,z) 处电场强度的振幅，该点基模高斯光束的光强分布为



$$I = I_0 \exp\left(-\frac{2\left(x^2+y^2\right)}{\omega^2\left(z\right)}\right) \tag{1-3.2}$$

式中：I_0 是光斑中心 $(0,0,z)$ 处的光强，I 是光束在 z 处横截面内，离光斑中心距离 $r=\sqrt{x^2+y^2}$ 处的光强，显然，光强分布是高斯分布。高斯光束的光斑半径 $\omega(z)$ 定义为在 z 光束横截面内，光强下降到光斑中心点光强 I_0 的 $1/e^2$ 时所对应的圆半径，表示为

$$\omega\left(z\right) = \omega_0\sqrt{1+\left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2}\right)^2} \tag{1-3.3}$$

式中：λ 是激光光波波长，ω_0 是高斯光束的束腰半径。式(1-3.3)可变为

$$\frac{\omega^2\left(z\right)}{\omega_0{}^2} - \frac{z^2}{\left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}\right)^2} = 1 \tag{1-3.4}$$

可见，沿 z 轴方向传播的基模高斯光束，它的 $\omega(z)$ 随 z 轴呈双曲线规律变化，如图 1-3.1 所示。

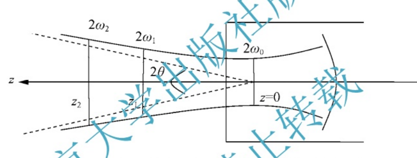


图 1-3.1　光束截面与传播距离的关系图

光束截面最小的位置称为高斯光束的束腰，最小的光束截面半径称为束腰半径，用 ω_0 表示，设此处为 z=0，高斯光束的束腰半径 ω_0 由谐振腔的结构决定，与谐振腔的腔长或球面镜的曲率半径有关。高斯光束的发散角定义为两条双曲线的渐近线的夹角。

$$2\theta\left(z\right) = 2\frac{\mathrm{d}\omega\left(z\right)}{\mathrm{d}z} = \frac{2\frac{\lambda}{\pi\omega_0}}{\left[1+\left(\frac{\pi\omega_0{}^2}{\lambda z}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{1-3.5}$$

在 $z \gg \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ 的远场情况下，光束的发散角称为远场发散角，一般情况下，用远场发散角来衡量激光束的发散程度。

$$2\theta_0 = \lim_{z\to\infty} 2\theta\left(z\right) = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0} \tag{1-3.6}$$

设距离束腰 z_1、z_2 处的光束截面半径分别为 ω_1、ω_2。则由式(1-3.4)可得

$$|z_1 - z_2| = \frac{\omega_0 \pi}{\lambda} \left| \sqrt{\omega_1{}^2 - \omega_0{}^2} - \sqrt{\omega_2{}^2 - \omega_0{}^2} \right| \tag{1-3.7}$$

所以，只要测出了两个不同位置处(距离束腰 z_1、z_2 处)的光束截面半径 ω_1、ω_2，就可以利用式(1-3.7)和式(1-3.6)求出高斯光束的束腰半径 ω_0 和远场发散角 $2\theta_0$。

基模高斯光束的共焦参数 f 为

$$f = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \tag{1-3.8}$$

(二) 激光参数测量方法

当实验测得任意两点 z_1、z_2 处的光束半径 ω_1、ω_2，由式(1-3.7)、式(1-3.6)可算出束腰半径和远场发散角。此方法需要用 MATLAB 编程用迭代法计算束腰半径。

(三) 实验系统

实验装置如图 1-3.2 所示，包括 He-Ne 激光器(λ=0.6328μm)、CCD 相机、光衰减片、位移台、图像捕获卡或 USB 数据线、计算机以及光束测量软件。He-Ne 激光器的输出光经光衰减片衰减后，进入 CCD 相机，CCD 相机将接收到的光信号变成电信号送到数据采集卡，再经光束测量软件计算出 CCD 相机接收到的光斑大小和激光能量分布。通过位移平台改变 CCD 相机与 He-Ne 激光器之间的距离，从而测出激光束在不同位置处的光束半径，再利用式(1-3.7)和式(1-3.6)求出该光束的束腰半径 ω_0 和远场发散角 $2\theta_0$。

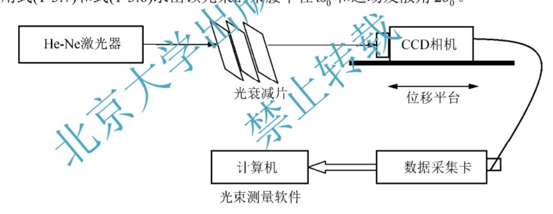


图 1-3.2 激光束参数测量系统

在这个系统中，特别要注意的是考虑激光的衰减，因为激光器发出光的功率一般比较高，而 CCD 相机对光很敏感，光强如果超出其量程范围，就会对 CCD 相机造成损害，所以在实验过程中要预先使用光衰减片对激光进行衰减。此外光束测量软件中的相关功能也可以帮助我们有效保护 CCD 相机。如图 1-3.3(b)所示，在软件界面中的 3 维轮廓窗口的左边有一个按 7 色彩虹颜色排列的光亮度对比条，按照这个指示，我们很容易知道现在 CCD 相机正在接收到的激光强度是否已超出了其量程。如果光束 3D 图像中出现白色，则表示光强已快接近饱和，这时应该减少激光器的输出功率或者增加衰减片的衰减量来保护 CCD 相机。

此外，还要注意实验操作暗室的效果一定要好，因为背景光会对激光产生相当大的影响，导致实验误差比较大。



四、实验仪器设备

He-Ne 激光器及其驱动电源	位移台	CCD 相机
光衰减片	计算机	光束测量软件

五、实验步骤

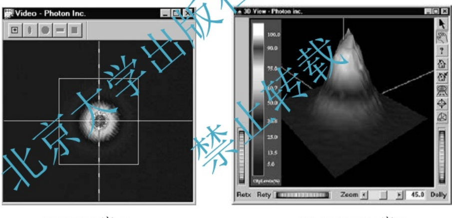
(1) 按图 1-3.2 初步放好 He-Ne 激光器、光衰减片，并将 CCD 相机放在位移平台上并最靠近激光器的位置处，连好 CCD 相机和图像采集卡之间的导线。

(2) 实验前盖紧 CCD 相机盖子，打开 He-Ne 激光器的电源开关。

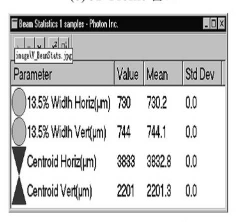
(3) 调整光路，保证在位移平台上移动 CCD 相机的过程中光束基本在 CCD 相机的视场中心。

(4) 加光衰减片(从最大衰减率开始)，关闭门窗、窗帘和照明光源。

(5) 启动光束测量软件，在软件界面中，打开 4 个窗口：Video 窗口，Dual Aperture Profile 窗口，Beam Statistics 窗口，3D Profile 窗口。Video 窗口显示激光束的二维视频图像，3D Profile 窗口显示激光束的三维图像，Dual Aperture Profile 窗口显示激光束的在 x 方向和 y 方向的能量分布曲线图，Beam Statistics 窗口显示测得的激光束的光斑直径等参数，如图 1-3.3 所示。



(a) Video 窗口　　(b) 3D Profile 窗口

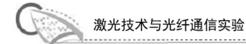

Beam Statistics 1 samples - Photon Inc.

Parameter	Value	Mean	Std Dev
13.5% Width Horiz(μm)	730	730.2	0.0
13.5% Width Vert(μm)	744	744.1	0.0
Centroid Horiz(μm)	3833	3832.8	0.0
Centroid Vert(μm)	2201	2201.3	0.0

(c) Beam Statistics 窗口　　(d) Dual Aperture Profile 窗口

图 1-3.3　激光束测量软件的主要窗口





(6) 打开 CCD 的盖子和驱动电源。

(7) 根据 Video 窗口或者 3D Profile 窗口中显示的激光光束图像的颜色，选择恰当的衰减片。为了最大程度地利用 CCD 相机的动态范围，也为了更准确地测量激光光束参数，要正确调整好衰减片。调整衰减片时，观察光束视频窗口的光斑图像，如果光斑中心出现白色，说明此时光强达到或者超过了 CCD 相机的动态范围，要增加衰减片。如果光束中心没有白色，而且未出现红色(一般呈现蓝、绿、黄等颜色)，则表明对光束的衰减过于严重，此时应该减少衰减片，直至中心呈现红色为止。

(8) 测量激光束的参数，根据 Beam Statistics 窗口的数据，记录 x 方向和 y 方向的光斑直径以及此时 CCD 相机在位移平台上的位置在表 1-3.1 中。

(9) 改变 CCD 相机在位移平台上的位置，重复步骤(8)，测出不同位置处激光束的光斑尺寸。利用式(1-3.7)和式(1-3.6)求出该光束的束腰半径 ω_0 和远场发散角 $2\theta_0$。

测量参数说明：

13.5% Width Horiz：表示水平方向的最大光强减小到 $1/e^2$ 处所对应的光斑大小直径。

13.5% Width Vert：表示垂直方向的最大光强减小到 $1/e^2$ 处所对应的光斑大小直径。

Centroid Horiz：表示从光束区域的左上部沿水平方向到光束质心的距离。

Centroid Vert：表示从光束区域的左上部沿垂直方向到光束质心的距离。

Value：代表光束参数的当前值。

Mean：代表取样后所有取样值的平均值。

StdDev(standarddeviation)：即标准偏差表示一种衡量分布中的分散或变化情况的数据，其值等于该分布算术平均数之间离差平方的算术平均数的平方根。

对话框说明：

1) “统计选项设置”对话框(见图 1-3.4)

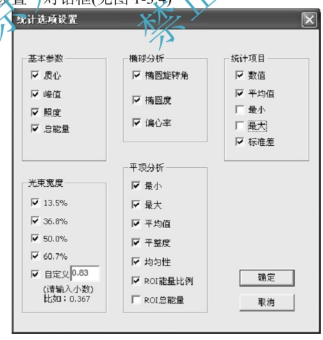


图 1-3.4 “统计选项设置”对话框



该对话框用来设置要显示的结果内容。

光束宽度：

13.5%：(86.5%环绕能量)水平和垂直或最大和最小轴。

36.8%：(63.2%环绕能量)水平和垂直或最大和最小轴。

50.0%：(50.0%环绕能量)水平和垂直或最大和最小轴。

60.7%：(39.3%环绕能量)水平和垂直或最大和最小轴。

自定义：用户自定义的值，水平和垂直或最大和最小轴。

基本参数：

质心坐标：光束质心的坐标。

峰值坐标：光束峰值点的坐标。

照度：光束峰值处的辐照度。

总能量：光束的总能量。

椭球分析：

默认情况下，数据分析是沿像素阵列的水平和垂直方向进行的。椭球分析就是沿椭圆的长轴和短轴方向进行的。

椭圆旋转角：椭圆的长轴与水平方向的夹角。

椭圆度：椭圆的椭圆度，椭圆的长轴与短轴之差。

偏心率：椭圆的偏心率，椭圆两焦点间距离和长轴长度的比值。

平顶分析：

ROI：analysis of energy Region of Interest，感兴趣的能量区域，是用户自定义的区域。

最小值：ROI 中的能量最小值。

最大值：ROI 中的能量最大值。

平均值：ROI 中的平均能量值。

平整度：ROI 的平滑度。

均匀性：ROI 的均匀性。

ROI 能量百分比：ROI 能量占光束总能量的百分比。

ROI 总能量：ROI 的总能量。

统计项目：

当前值：光束参数的当前值。

平均值：已获取光束参数的平均值。

最小值：已获取光束参数的最小值。

最大值：已获取光束参数的最大值。

标准差：已获取光束参数的标准偏差。

2) “软件设置”对话框(见图 1-3.5)

ROI 阈值：它将影响 ROI 的大小。

椭圆阈值：可以选择要拟合的椭圆位于峰值的多大能量比例处。

光束区域边长：对不同的光斑设置不同的光束区域。

连续拍摄张数：对于连续分析模式控制其拍摄图像数目。



图 1-3.5 “软件设置”对话框

3) “时间统计”对话框(见图 1-3.6)

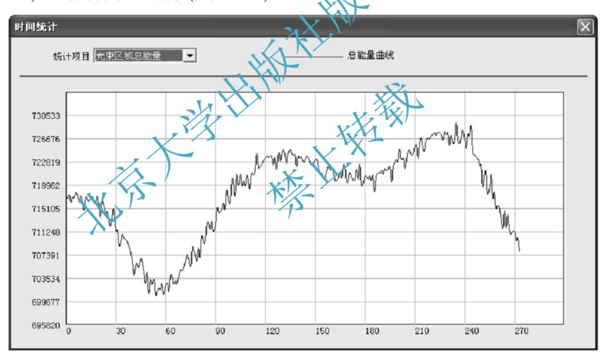


图 1-3.6 “时间统计”对话框

用来实时显示不同统计项的统计时间曲线，统计项目可以通过左上方的下拉列表选择。

4) “激光质量参数计算”对话框

输入被测激光光束波长，两次测量位置之间的距离，以及在水平和垂直两个方向上的光斑直径，即可得到两个方向上的光腰半径 ω_0 和远场发散角 2θ，如图 1-3.7 所示。

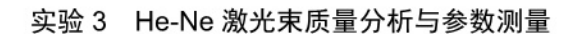






图 1-3.7　“激光质量参数计算”对话框

六、注意事项

(1) 一定要保证非常微弱的激光功率下打开 CCD 相机盖子，否则可能导致光敏面损伤。

(2) 即使非常微弱的背景光进入 CCD 相机都会导致测量结果的很大误差。

(3) 尽量避免位移台晃动，以免激光光束离开 CCD 相机视场。

七、实验数据与分析

(1) 记录 CCD 相机在位移平台上的位置及对应的 x 方向和 y 方向的光斑直径，数据填入表 1-3.1 中。

表 1-3.1　CCD 相机位置及对应的光斑直径

CCD 相机位置 z(mm)	x 方向/μm		y 方向/μm	
	13.5%width hor		13.5% width ver	
	mean 直径	radius 半径	mean 直径	radius 半径
0				
20				
40				
60				
80				
100				
120				
140				
160				
180				
200				
220				
240				

(2) 以平台位置为横坐标，分别以 x 和 y 方向的光斑直径为纵坐标作图(MATLAB 画图)，并分析其变化规律。

(3) 根据实验数据用迭代法求出束腰半径和发散角(MATLAB 编程)，填入表 1-3.2 中。

表 1-3.2　计算束腰半径和远场发散角

	z_1	z_2	ω_0	θ_0	$\overline{\omega_0}$	$\overline{\theta_0}$
x 方向						
y 方向						

八、思考题

(1) 为什么一定要保证在非常微弱的激光功率下打开 CCD 相机的盖子？

(2) 气体激光器与半导体激光器的光斑模式有何区别？

(3) 分析实验过程中，哪些因素会影响测量精度？

附录：

用迭代法求解方程：$|z_1 - z_2| = \dfrac{\pi\omega_0}{\lambda}\left|\sqrt{\omega_1^2 - \omega_0^2} - \sqrt{\omega_2^2 - \omega_0^2}\right|$

方法：令 $\Delta z = |z_1 - z_2|$，$\Delta z = \dfrac{\pi\omega_0}{\lambda}\left|\sqrt{\omega_1^2 - \omega_0^2} - \sqrt{\omega_2^2 - \omega_0^2}\right|$，

令 $f(\omega_0) = \dfrac{\pi\omega_0}{\lambda}\left|\sqrt{\omega_1^2 - \omega_0^2} - \sqrt{\omega_2^2 - \omega_0^2}\right|$　　(1)

迭代法求解步骤如下。

(1) 设起始点为 ω_0，最大迭代次数 N 和精度要求 ε。

(2) 当迭代次数 $i \leqslant N$ 时，执行步骤(3)～(4)。

(3) 将 ω_0 代入式(1)的右边，得到一个值 $f(\omega_0)$。

(4) 如果 $\left|\dfrac{\Delta z - f(\omega_0)}{\Delta z + f(\omega_0)}\right| < \varepsilon$ (ε 是一个很小的值)，则该 ω_0 即为所求的束腰半径，结束程序，输出此时的 ω_0。否则，改变 ω_0 的值，且迭代次数加 1(i=i+1)，重复步骤(3)～(4)，直到满足 $\left|\dfrac{\Delta z - f(\omega_0)}{\Delta z + f(\omega_0)}\right| < \varepsilon$，输出此时的 ω_0。

(5) 若 $i > N$ 时，结束程序，给出错误信息。



MATLAB 程序：

```
lmda=0.6328;                   %氦氖激光器的波长，单位：μm
detz=100000;                   %abs(z1-z2)， 根据具体实验数据确定，单位：μm
om1=484.65;                    %z1 处的光腰半径，根据具体实验数据确定，单位：μm
om2=443.68;                    %z2 处的光腰半径，根据具体实验数据确定，单位：μm
x=300;                         %迭代起始点
for t=1:10000
     y(t)=3.14* x*(abs ( sqrt(om1^2-x^2)-sqrt(om2^2-x^2)))/ (lmda );
     if abs(y(t)-detz)/(y(t)+detz)<0.001
        break;
      end;
      x=x+0.01;
end;
if t==10000
'It failure!';                 %显示错误信息
 end;
display(x);
oum0=x;                        %求得的束腰半径
staf=2*lmda/(3.14*oum0);       %得到的发散角，单位：rad
stad=(staf/3.14)*180;          %得到的发散角，单位：度
display(staf);
display(stad);
```

实验 4

声光锁模与腔内选频单纵模激光实验

一、实验目的

(1) 学习和掌握激光锁模和声光调制原理。

(2) 掌握锁模激光器结构特点及调试方法。

(3) 观察腔长变化及调制深度对输出光脉冲的影响。



二、实验内容

(1) 调整准直氦氖激光的高度和方位角，使激光水平、垂直通过全反镜、半反镜、氦氖激光管的中心。

(2) 利用谐振腔原理，产生近 30mW 的氦氖激光输出。

(3) 利用声光调制电源和声光调制晶体，产生拉曼-奈斯衍射。

(4) 产生声光调制激光输出。

(5) 用共焦腔和光接收器观察声光调制激光波形。

(6) 改变声光调制频率和调制电流大小，锁定激光频率。

(7) 用选频晶体获取单一频率的激光输出。

三、实验原理

(一) 锁模激光器原理

锁模技术是一种广泛用来产生超短光脉冲的重要技术。自从 1964 年首次实现 He-Ne 激光器的锁模运转以来，这一技术得到很快的发展。利用锁模技术可得到持续时间短到皮秒($ps = 10^{-12}$s)量级的强短脉冲激光，峰值功率可达到百兆瓦量级。20 世纪 80 年代后期利用碰撞锁模技术可获得持续时间短到飞秒($fs = 10^{-15}$s)量级的超短脉冲。目前，它已应用于激光受控核聚变、等离子物理、激光远程精密测距、激光瞬态光谱学、高速摄影、非线性光学以及光通信等领域中。

1. 锁模原理

一般非均匀加宽激光器，如果不采取特殊选模措施，总是得到多纵模输出。并且，由于空间烧孔效应，均匀加宽激光器的输出也往往具有多个纵模。

假设激光输出的第 q 个模式在某一位置 z 处的电场分布为



$$E_q(z,t)=E_q\exp\left\{i\left[\omega_q\left(t-\frac{z}{c}\right)+\varphi_q\right]\right\} \tag{1-4.1}$$

式中：E_q、ω_q、φ_q为第q个模式的振幅、角频率及初始相位。一般自由运转激光器的输出是一系列的纵模组成，它们的相位关系是随机的，各个模式互不相干，因而激光输出是它们的无规律叠加的结果，输出强度是随机起伏涨落的，从时间域上看，是一种噪声输出。锁模就是设法强迫这些纵模相互之间保持固定的相位关系，得到相干叠加，使激光器输出一系列时间间隔一定的超短脉冲。

锁模激光脉冲的特点：He-Ne 激光介质的增益特性属非均匀加宽类型，如果激光器的腔长不太短，就会出现多个激光纵模振荡(本实验只讨论基横模情况)。相邻纵模的角频率差为

$$\omega_{q+1}-\omega_q=\Delta\omega=\frac{\pi c}{L} \tag{1-4.2}$$

式中：c 为光速；L 为腔长。假设激光器腔内有 $q=-N,-(N-1),\cdots,-1,0,1,\cdots,(N-1),N$ 等 $(2N+1)$ 个纵模存在。则腔内 $(2N+1)$ 个纵模的电场强度和为

$$E(z,t)=\sum_{q=-N}^{N}E_q\exp\left\{i\left[(\omega_0+q\cdot\Delta\omega)\left(t-\frac{z}{c}\right)+\varphi_q\right]\right\} \tag{1-4.3}$$

式中：ω_0为增益线宽中心处的纵模频率。假设各纵模振幅相等，即$E_q=E_0$，可得激光总强度正比于各纵模强度之和。

$$I=\overline{I(z,t)}\propto(2N+1)E_0^2 \tag{1-4.4}$$

通过锁模后，各模式相位被锁定，假设相邻模式的初始相位之差保持一定(称为相位锁定)，即

$$\varphi_q-\varphi_{q-1}=\beta$$
$$\varphi_q=\varphi_0+q\beta$$

可得

$$E(z,t)=E_0e^{i\omega_0\left(t-\frac{z}{c}\right)}\sum_{q=-N}^{N}e^{i\left[q\cdot\Delta\omega\left(t-\frac{z}{c}\right)+\varphi_0+q\beta\right]}$$

$$E(z,t)=E_0e^{i\left[\omega_0\left(t-\frac{z}{c}\right)+\varphi_0\right]}\sum_{q=-N}^{N}\cos q\left[\Delta\omega\left(t-\frac{z}{c}\right)+\beta\right] \tag{1-4.5}$$

利用三角函数求和公式，可得

$$E(z,t)=A(t)e^{i\left[\omega_0\left(t-\frac{z}{c}\right)+\varphi_0\right]}$$

$$A(t)=E_0\frac{\sin\frac{1}{2}(2N+1)q\cdot\left[\Delta\omega\left(t-\frac{z}{c}\right)+\beta\right]}{\sin\frac{1}{2}q\cdot\left[\Delta\omega\left(t-\frac{z}{c}\right)+\beta\right]} \tag{1-4.6}$$

其光强为

$$I(t)\propto A^2(t)=E_0^{\ 2}\frac{\sin^2\frac{1}{2}(2N+1)q\cdot\left[\Delta\omega\left(t-\frac{z}{c}\right)+\beta\right]}{\sin^2\frac{1}{2}q\cdot\left[\Delta\omega\left(t-\frac{z}{c}\right)+\beta\right]} \tag{1-4.7}$$

由式(1-4.7)可见，连续输出的光强变成了随时间 t 和空间 z 变化的光强。现在分别在固定空间或固定时间上来观察光强的变化特点。

(1) 当固定空间位置(令 $z=0$)观察式(1-4.7)随时间的变化关系有

$$I(t)\propto A^2(t)=E_0^{\ 2}\frac{\sin^2\frac{1}{2}(2N+1)q\cdot[\Delta\omega t+\beta]}{\sin^2\frac{1}{2}q\cdot[\Delta\omega t+\beta]} \tag{1-4.8}$$

在式(1-4.8)的分母趋于零时，即 $q\cdot[\Delta\omega t+\beta]=2m\pi$ 时($m=0,1,2,L$)，可得光脉冲的峰值光强

$$I(t)\propto(2N+1)^2E_0^{\ 2} \tag{1-4.9}$$

与式(1-4.4)比较，锁模后激光脉冲峰值功率比自由振荡时的平均光强大了 $(2N+1)$ 倍。腔长越长，荧光线宽越大，腔内振荡的纵模数目越多，锁模脉冲的峰值功率就越大。

式(1-4.8)还有以下特点。

$(2N+1)$ 个有相同频率间隔的同步等幅振荡，可使激光光强变成随时间变化的脉冲序列，脉冲的周期 T_0 为

$$T_0=\frac{2\pi}{\Delta\omega}=\frac{2L}{c} \tag{1-4.10}$$

可见锁模脉冲的周期 T_0 是光脉冲在腔内来回传播一次所需的时间。因此可以把锁模激光器的工作过程形象的看作有一个脉冲在腔内往返运动，每当此脉冲行进到输出镜时，就有一个锁模脉冲输出。

脉冲峰值与第一光强为零的谷值间的时间间隔，即光脉冲的宽度 τ 为

$$\tau=\frac{2\pi}{(2N+1)\Delta\omega}=\frac{1}{\Delta\upsilon} \tag{1-4.11}$$

脉冲的半功率点的时间间隔近似等于 τ，$\Delta\nu$ 为锁模激光的带宽。锁住的纵模个数越多，锁模脉宽就越窄。图 1-4.1 给出 $E_0=1$，$(2N+1)=7$ 时，$I(t)$ 随时间变化的示意图。

(2) 当固定时间(令 $t=0$)观察式(1-4.7)的空间变化关系有

$$I(t)\propto A^2(z)=E_0^{\ 2}\frac{\sin^2\frac{1}{2}(2N+1)q\cdot\left[\pi\frac{z}{c}+\beta\right]}{\sin^2\frac{1}{2}q\cdot\left[\pi\frac{z}{c}+\beta\right]} \tag{1-4.12}$$

式(1-4.12)有以下特点。

$(2N+1)$ 个有相同频率间隔及同步等幅振荡的纵模，相干叠加后变成了随空间距离周期变化的脉冲激光序列，光脉冲的空间周期为 $2L$。

输出光脉冲的峰值强度为

$$I(t) \propto g(2N+1)^2 E_0^{\ 2} \tag{1-4.13}$$

式中：g 为激光腔镜的透射率。

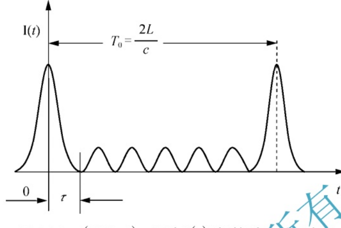


图 1-4.1　$(2N+1)=7$ 时 $I(t)$ 随时间变化的示意图

光脉冲的空间宽度为 $2L/(2N+1)$。锁住的纵模个数越多，光脉冲的空间宽度就越窄。

以上描述的是锁模激光的特性。问题是如何实现使腔内同时存在的 $(2N+1)$ 个纵模有相同的相位，这就要靠锁模技术。

2. 实现锁模的方法

在一般激光器中，各纵模振荡互不相干，各纵模相位没有确定关系。并且由于频率牵引和频率推斥效应，相邻纵模的频率间隔并不严格相等。因此为了得到锁模超短脉冲，必须采取措施强制各纵模初始相位保持确定关系，并使相邻纵模频率间隔相等。

目前，采用的锁模方法有主动锁模、被动锁模与自锁模。

例如在激光腔内放入可饱和吸收元件。这类元件在腔内运转过程中不能用人为的方法控制，故称为被动锁模。有的在激光腔内放置调制元件，对光波进行调幅或调相。这类器件的某些参数可以人为地加以控制，用这类器件实现锁模的则称为主动锁模。主动锁模又分两种，一种是调制振幅的调幅锁模，简称 AM；另一种是调制频率的调频锁模，简称 FM。

本实验采用主动锁模的调幅技术，在激光腔内插入损耗调制器，使激光纵模强度在腔内受到周期性的损耗调制，假设损耗调制的函数形式为

$$E = E_{\mathrm{m}} \cos \Delta\omega t \tag{1-4.14}$$

式中，$\Delta\omega = \pi c / L$ 为调制频率，也等于激光器相邻纵模的频率间隔。如果激光器中增益曲线中心频率 ω_0 处的纵模首先振荡，其电场强度为

$$E_0(t) = \left[E_0 + E_{\mathrm{m}} \cos(\Delta\omega t)\right]\cos(\omega_0 t + \varphi_0) \tag{1-4.15}$$

令调幅系数 M_{a}

$$M_{\mathrm{a}} = \frac{E_{\mathrm{m}}}{E_0} \tag{1-4.16}$$

式(1-4.15)改写为

$$E_0(t) = E_0\left[1 + M_{\mathrm{a}} \cos(\Delta\omega t)\right]\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$= E_0\cos(\omega_0 t+\varphi_0)+\frac{M_a}{2}E_0\left[\cos(\omega_0+\Delta\omega)t+\varphi_0\right] + \frac{M_a}{2}E_0\left[\cos(\omega_0-\Delta\omega)t+\varphi_0\right] \tag{1-4.17}$$

从式(1-4.17)可知，调制的结果使中心纵模振荡不仅包含原有角频率 ω_0 的成分，还含有角频率为 $(\omega_0\pm\Delta\omega)$、初相位不变的两个边带。其频谱如图 1-4.2 所示。边带频率正好等于无源腔中的相邻纵模的频率。这就是说，在激光器中，一旦在增益曲线的某个角频率 ω_0 形成振荡，将同时激起两个相邻纵模的振荡。并且，这两个相邻纵模幅度调制的结果又将产生新的边频，因而激起角频率为 $(\omega_0\pm 2\Delta\omega)$ 的纵模振荡，如此继续下去，直到线宽范围内的纵模均被耦合而产生振荡为止。

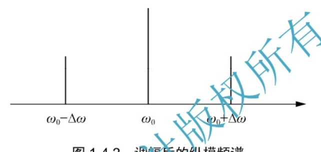


图 1-4.2　调幅后的纵模频谱

可见，由于调幅导致的相邻纵模间的能量耦合使所有纵模具有相同的初相位，即各纵模的相位被锁定，且相邻纵模角频率间隔均等于 $\Delta\omega$，于是各纵模相干叠加的结果产生超短脉冲。因此实现了同步振荡，达到了锁模的目的。

还可以从时域的角度看，因损耗调制的周期 $T_0=\frac{2\pi}{\Delta\omega}=\frac{2L}{c}$ 与光在腔内往返一次的时间相同，当调制器损耗为零时通过调制器的光波，在腔内往返一周回到调制器时仍是损耗为零，光波从介质中得到的增益大于腔内的损耗时，这部分光波就会得到不断增强直到饱和稳定。当调制器损耗较大时通过的光波每次回到调制器时都收到较大的损耗，若损耗大于往返一次从介质中得到的增益，这部分光波不能形成激光振荡，所以激光形成了周期为 $2L/c$ 的光脉冲序列。

(二) 声光调制原理

声光调制器是一种声和光相互作用形成的调制器，它可以实现对激光的强度调制、频率调制、位相调制和角度(光束方向)调制，调制频率可达几十 MHz 或上百 MHz。

1. 声光效应与声光衍射

当一块透明介质(晶体)受外力作用时，介质的折射率会发生变化，这就是弹光效应，这种介质称为弹光介质或弹光晶体。声波是一种机械应力弹性波，当超声波作用于弹光介质时，也会引起弹光效应。通常把超声波引起的弹光效应称为声光效应。因此，当超声波在声光介质中传播时，介质密度呈疏密的交替变化，导致介质折射率大小的交替变化。这样，可以把超声波作用下的介质等效为一块“相位光栅”，即声光栅。光栅的条纹间隔等于超声波的波长 λ。当光束通过声光栅时，将产生衍射，如图 1-4.3 所示。衍射光束的强

度、频率和方向都随着超声场的变化而变化，所以声波对光的作用提供了一种调制光束频率、光强和传播方向的方法。

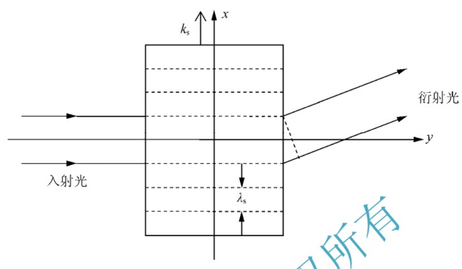


图 1-4.3　声光衍射

当介质中传播着角频率为 ω_s、波长为 λ_s、波矢为 k_s，方向指向 x 轴的超声波时，这种弹性波在介质中引起的应变 S 可表示为

$$S = S_0 \sin(\omega_s t - k_s x) \tag{1-4.18}$$

式中，S_0 为应变振幅，弹性应变将使介质中的折射率 n 发生变化。相应的折射率变化可表示为

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = pS \tag{1-4.19}$$

式中，p 为介质的弹光系数。折射率的变化 Δn 可写成

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 p S_0 \sin(\omega_s t - k_s x) \tag{1-4.20}$$

可见，折射率在 x 方向发生正弦式的变化，当应变较小时，略去对时间的依赖关系，将折射率写成以下形式：

$$n(x) = n_0 - \Delta n \sin k_s x \tag{1-4.21}$$

根据入射光的入射角的不同和声光相互作用的长短不同，声光衍射可分作两类，一类叫拉曼–奈斯(Raman-Nath)衍射，另一类叫布拉格(Bragg)衍射。

1) 拉曼–奈斯衍射

当入射光垂直于声波传播方向，且沿通光方向的声光作用长度 L 较短，并有 $L < \frac{L_0}{2}$ ($L_0 = \frac{\lambda_S^{\ 2}}{\lambda}$ 称为特征长度，λ_S 为声波波长，λ 为入射光波长)，就会产生对称于零级的多级衍射，这就是拉曼–奈斯衍射。各级衍射光的方向角 θ 由式(1-4.22)决定：

$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{\lambda_s} \tag{1-4.22}$$

式中：m 为衍射级，m＝0，±1，±2，…，由于 $\lambda_s >> \lambda$，所以衍射角很小。

(1) 当声波在介质中以行波方式传播时，介质中折射率变化如式(1-4.20)所示。各级衍射光波光场幅度有以下形式：

$$J_m(\xi)\exp\left[i(\omega - m\omega_s)t\right] \tag{1-4.23}$$

$J_m(\xi)$ 为 m 级贝塞尔函数，是 m 级衍射光波的相对振幅，ξ 如式(1-4.24)所示。

$$\xi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta nL \tag{1-4.24}$$

ξ 为光波通过声光作用区 L 获得的最大附加相位差，称为声致相移。ω 为入射光的角频率，各级衍射光为单色光，其角频率变为 $\omega \pm m\omega_s$。除零级衍射光频率不变外，各级衍射光均发生了多普勒频移，各级衍射光的频率变化如图 1-4.4 所示。

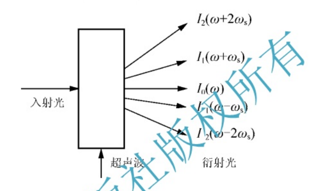


图 1-4.4 弹性行波产生衍射的频移

(2) 当声波在介质中以驻波方式传播时，折射率的变化有如下形式：

$$\Delta n = \mu \sin\omega_s t \sin k_s x \tag{1-4.25}$$

μ 的大小取决于声光介质特性和声场的强弱。

在垂直入射的情况下，各级衍射光波光场幅度由式(1-4.26)表示：

$$J_m(\xi \sin\omega_s t)\exp(i\omega t) \tag{1-4.26}$$

$J_m(\xi \sin\omega_s t)$ 为第 m 级贝塞尔函数，是第 m 级衍射光波的振幅，它受到了 $\xi \sin\omega_s t$ 的调制，所以各级衍射光不再是单色光，而是含有多种频率成分的合成光，各级衍射光的频率成分如图 1-4.5 所示。

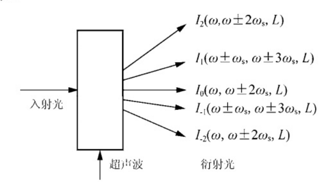


图 1-4.5 弹性驻波产生的衍射的频移

0 级衍射光束其强度正比于 $J_0^2(\xi \sin\omega_s t)$。由于 J_0 是偶函数，所以其光强将受到 $2\omega_s$ 频率的调制。



2) 布拉格衍射

当声光作用区比较长，满足 $L > 2L_0$，且入射光以一定角度斜入射声光介质，则产生布拉格衍射。光波的入射角等于衍射角并满足下列关系式：

$$\sin\theta_B = \frac{m\lambda}{2\lambda_s} \tag{1-4.27}$$

式中：m=0，±1 为衍射级；θ_B 为布拉格角。布拉格衍射光束是不对称的，只出现 0 级和+1 级，或者出现 0 级和−1 级(视入射光的方向而定)，±1 级不同时存在。

2. 声光调制器

在锁模激光器中驻波型的声光器件结构如图 1-4.6 所示，除电极以外主要由 4 部分组成。

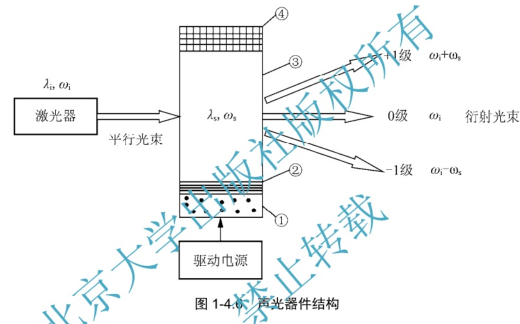


图 1-4.6　声光器件结构

图 1-4.6 中①是压电换能器，它把外加一定频率的电磁波转换成机械波，其厚度为声波的半波长。②是键合层，作用是把压电层的机械振动耦合到声光介质中去形成超声波。③是声光介质，即声光作用区，其厚度是声波半波长的整倍数。④是反射层，使声波在声光介质中形成驻波。若要使超声场工作在行波状态，则④为吸收层，用来吸收已通过介质的声波，以免返回介质产生干扰。

光束通过声驻波介质的衍射，其 0 级衍射光强将获得二倍于外加电源驱动频率的调制。当此调制频率正好等于激光纵模频率时，声光调制器就能实现损耗调制。对于输出波长为 633nm 的 He-Ne 激光器，其增益系数不大，每米约为 10%，若腔内损耗大于增益时，激光将不能产生振荡。若声光调制器的衍射损耗能在 0～10%范围内调制变化，就能对 633nm 激光进行锁模控制。拉曼−奈斯型 0 级衍射性能即可达到上述要求，而且入射光束与 0 级衍射光束方向一致，给实验调节带来很大方便。

(三) 模式选择原理

激光的优点在于拥有良好的单色性、方向性以及相干性。理想的激光器的输出光束应该只具有一个模式，如果不采取相关的选模措施，大多数激光器的工作状态往往是多模的。

含有高阶横模的激光束光强分布不均匀而且光束发散角较大，含有多纵模的激光束单色性和相干性都很差。激光准直、激光中远程测距、激光加工、非线性光学研究等应用均需要基横模的激光束；在精密干涉测量，光通信以及大面积全息照相等应用不仅要求激光是单横模的，同时要求光束仅含有一个纵模。

1) 横模选择

横模选择的物理基础是谐振腔中不同横模具有不同的损耗。在稳定腔中，基横模的衍射损耗最低，随着横模阶数的提高，衍射损耗将会迅速增加。

激光器以 TEM_{00} 模单模运转的充分条件是：TEM_{00} 模的单程增益至少可以补偿它在腔内的单程损耗，用公式表达为

$$e^{g_{00}^{0}l}\cdot\sqrt{r_1r_2}\cdot\left(1-\sigma_{00}\right)\geqslant 1 \tag{1-4.28}$$

并且损耗高于基横模的相邻横模，例如 TEM_{10} 模，应该同时满足

$$e^{g_{10}^{0}l}\cdot\sqrt{r_1r_2}\cdot\left(1-\sigma_{10}\right)<1 \tag{1-4.29}$$

式中：g_{00}^{0} 和 g_{10}^{0} 分别表示为工作物质中 TEM_{00} 模和 TEM_{10} 模的小信号增益系数；δ_{00} 和 δ_{10} 分别表示为工作物质中 TEM_{00} 模和 TEM_{10} 模的单程衍射损耗。

在每个横模的增益差不多相同的情况下，不同横模间衍射损耗的差别是进行横模模式选择的依据。因此，为了提高横模的鉴别率，必须尽量提高高阶横模与基横模的衍射损耗比，即尽量增大 δ_{10}/δ_{00}，同时还应该使衍射损耗在总损耗中占有足够的比例。

衍射损耗的大小以及横模鉴别力的高低与谐振腔的腔型和菲涅尔数有关。根据相关理论可知，衍射损耗随着菲涅耳数的增大而减小，但是横模的鉴别力却随之提高。共焦腔和半共焦腔的 δ_{10}/δ_{00} 最大，而平面腔和共心腔的 δ_{10}/δ_{00} 最小。但是在另一方面，当纵模数 N 不太小时，共焦腔和半共焦腔的衍射损耗非常低，与另外的一些损耗相比，往往可以忽略不计，所以无法利用它的横模鉴别力高的优点实现选模。另外，共焦腔以及半共焦腔基模体积很小，所以当它单模振荡时功率也低。虽然平面腔与共心腔的模式鉴别力低，但是由于它衍射损耗的绝对值较大，反而更容易利用模式间的损耗差实现横模的选择，而且它们的模体积较大，可以获得高功率的单模振荡。

以下是可以实现横模选择的几种具体方法。

(1) 小孔光阑选模。

如图 1-4.7 所示，在谐振腔内设置小孔光阑或者限制工作物质的横截面积可以降低谐振腔的菲涅尔数，增加衍射损耗，使它满足选模的两个基本条件，从而使激光器实现基横模的运行。这一个方法的实质是使光斑尺寸较小的基模无障碍地通过小孔光阑，让光斑尺寸较大的高阶横模受到阻拦而遭受较大的损耗。小孔光阑的大小因其位置的不同而有差别，因为在谐振腔不同位置的光斑尺寸不同。为了扩大基横模的体积，充分地利用激光工作物质，常采用聚焦光阑法选模，如图 1-4.8 所示。

(2) 谐振腔参数 g、N 选择法。

适当地选择谐振腔的类型和腔参数 g、N 值，使得谐振腔的衍射损耗满足两个基本条件，可以让激光器输出基横模激光束，这类方法称为谐振腔参数 g、N 选择法。利用非稳腔的高损耗以及不同横模间的损耗有很大差异的特点，非稳腔选模在高增益激光器中被广



泛应用。

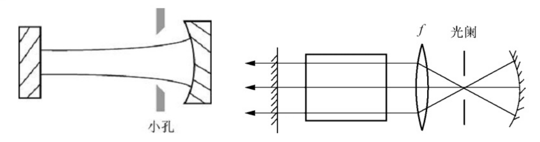


图 1-4.7　小孔光阑选模　　　　图 1-4.8　聚焦光阑选模

(3) 微调谐振腔。

对于平面腔而言，当腔镜倾斜时基模损耗的增加最显著，谐振腔的微调有利于高阶模的优先振荡。对于稳定腔而言，由于基模的体积最小而高阶模的体积较大，所以当腔镜倾斜时，高阶横模的损耗显著提高，基模受到的影响却较小，所仍然可以继续维持振荡。所以说，适当地将腔镜倾斜就可以抑制高阶横模。

2) 纵模选择

在激光工作物质中，往往存在着多对的激光振荡能级，可以用窄带介质膜反射镜、棱镜或光栅等组成色散腔以获得特定波长跃迁的振荡。

一般谐振腔中的不同纵模有着相同的损耗，但是由于频率的差异而具有不同的小信号增益系数。所以，扩大并充分利用相邻纵模间的增益差，或者人为地增加损耗差是进行纵模选择的有效方法。

(1) 短腔法。

缩短谐振腔的长度，可以增大相邻纵模的间隔，甚至可以在小信号增益曲线满足振荡阈值条件的有效宽度内，只存在着一个纵模，从而实现单纵模振荡，这个方法称为短腔法。短腔选模条件可以表达为

$$\Delta v_{\mathrm{q}} = \frac{c}{2L'} > \Delta v_{\mathrm{OSC}} \tag{1-4.30}$$

式中，Δv_{OSC} 是由 $g^0(v) > \delta / l$ 条件决定的振荡带宽。这一方法适用于荧光谱线较窄的激光器。

(2) 行波腔法。

在均匀加宽工作物质组成的激光器中，虽然增益饱和过程中的模式竞争效应有助于形成单纵模振荡，但是由于驻波腔中空间烧孔的存在，当激励足够强时，激光器仍然会出现多个纵模的振荡，如果采用环形腔，并且在腔内插入一个只允许激光单向通过的隔离器，就可以形成无空间烧孔的行波腔，从而实现单个纵模的振荡，如图 1-4.9 所示。

(3) 选择性损耗法。

另外一种重要的方法称为选择性损耗法。如图 1-4.10 所示，在腔内插入 F-P 标准具或者构成组合腔，由于多光束的干涉效应，谐振腔具有与频率有关的选择性损耗，损耗小的纵模形成振荡，损耗大的纵模被抑制。具体如图 1-4.11～图 1-4.13 所示。

由物理光学可知，标准具透射率峰对应的频率为

$$\nu_{\mathrm{j}} = jc/\left(2\mu d\cos\theta\right) \tag{1-4.31}$$

式中：j 为正整数；μ 为标准具两镜间介质的折射率；d 为标准具的长度；θ 为标准具内光线与法线的夹角。相邻透射率峰的频率间隔为

$$\Delta\nu_{\mathrm{j}} = \frac{c}{2\mu d\cdot\cos\theta} \tag{1-4.32}$$

图 1-4.9　环形行波腔激光器

图 1-4.10　腔内加入 F-P 标准具

图 1-4.11　小信号增益曲线

图 1-4.12　谐振腔纵模谱

图 1-4.13　F-P 标准具透射率曲线

透射谱线宽度

$$\delta\nu = \frac{c}{2\pi\mu d}\cdot\frac{1-r}{\sqrt{r}} \tag{1-4.33}$$

式中：r 为标准具两镜面的反射率。如果调整 θ 角，使得



$$\nu_{\mathrm{j}} = \nu_{\mathrm{q}} \tag{1-4.34}$$

而且

$$\Delta\nu_{\mathrm{j}} > \Delta\nu_{\mathrm{OSC}}, \quad \delta\nu < \Delta\nu_{\mathrm{q}} = \frac{c}{2L'} \tag{1-4.35}$$

则可获得单纵模输出。由上述公式可以求出标准具的长度 d 以及镜面反射率 r。

复合腔的形式多种多样，在福克斯-史密斯型复合腔中，由分束镜 M 和全反镜 M2 和 M3 组成的福克斯-史密斯干涉仪取代了谐振腔的一个反射镜，从而实现选择性反射。频率等于干涉仪反射峰频率的模式因具有最小的损耗而起振，其余模式则被抑制。

四、实验仪器设备

准直 He-Ne 激光器及其电源	He-Ne 放电管	布儒斯特窗片
声光调制器及其驱动电源	前后腔镜及调整架	激光功率计
分束镜	F-P 扫描干涉仪	锯齿波发生器
快速光电二极管接收器	标准镜(选模镜)	示波器

1. 实验装置及参数

实验装置如图 1-4.14 所示。Las 为 He-Ne 放电管，M_0 为布儒斯特窗片；M_1、M_2 是腔镜，M_1 镜装在可前后移动的镜座上，移动的精度可达 $10\,\mu\mathrm{m}$；M_3 是辅助腔镜，M_3 必须用平面镜；M_d 是声光调制器；M_4 是分束镜；D_1 是快速光电二极管，接 250MHz 示波器观察锁模脉冲序列；D_2 是激光功率计；F-P 是扫描干涉仪，接普通示波器观察激光纵模频率谱；L' 为锁模激光腔的几何长度。

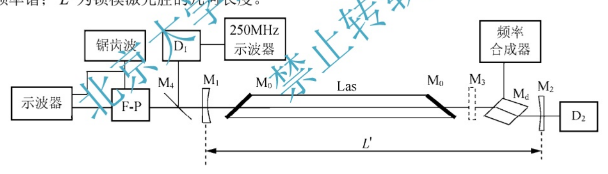


图 1-4.14　实验装置简图

2. 声光调制器数据

声光介质材料用熔石英，折射率 $n = 1.457$，声速 $V = 5960\mathrm{m/s}$，长度 $l = 17\mathrm{mm}$。为了减小调制器在腔内的插入损耗，声光介质的入射和出射界面加工成布儒斯特角的形状，如图 1-4.15 所示。θ_{b} 为布儒斯特角，图 1-4.16 中给出光程和几何程的关系。

超声频率 $\omega / 2\pi = 45.77\mathrm{MHz}$，波长 $\lambda = 130.22\mu\mathrm{m}$，特征长度 $l_0 = 39\mathrm{mm}$，本实验用的声光器件长度偏长，在正入射时仍有多级对称衍射出现。换能器面积 $4 \times 38\mathrm{mm}^2$。

根据调制器的频率 ω，可算出激光腔内所需光程长度：

$$L = \frac{\pi c}{2\omega} \tag{1-4.36}$$

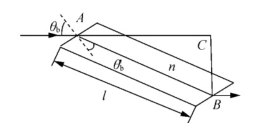


图 1-4.15　调制器光路

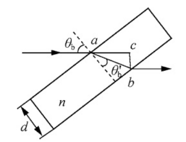


图 1-4.16　激光管窗片光路

由于激光腔内存在折射率大于 1 的声光介质和布儒斯特窗片，所以腔的光程长度 L 比几何长度 L'长。图 1-4.16 给出激光管窗片的光程和几何程的关系。窗片的材料为熔石英，折射率 $n=1.457$，厚度 $d=2\text{mm}$。根据图 1-4.15 和图 1-4.16 所示的三角形关系，可分别算出两个图的光程与几何程之差：

$$\varDelta_1 = nl - |AC|，\quad \varDelta_2 = n|ab| - |ac|$$

图中 $\theta_\text{b} = \arctan(1/n)$ 是介质内的布儒斯特角。已知 $\theta_\text{b} + \theta_\text{b}' = \pi/2$。由几何关系可得 $\angle B = 2\theta_\text{b}'$ 和 $\angle b = 2\theta_\text{b}'$，因此不难得到激光腔的实际几何长度：

$$L' = L - \varDelta_1 - 2\varDelta_2 \tag{1-4.37}$$

五、实验步骤

1. 调节 He-Ne 准直激光器

由于本系统的 He-Ne 放电管比较长，由它构成的直腔激光器是多谱线激光器，为了保证放电管在直腔下处于最佳工作状态，采用辅助激光器准直法调节光路，如图 1-4.17 所示。

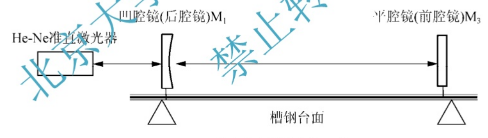


图 1-4.17　准直激光器的方位调整

(1) 用直尺测量光学平台表面与槽钢表面前端、后端的高度是否一致，即判断槽钢平台是否水平，若没有水平，则通过旋转槽钢底座螺丝钉进行调节。

(2) 放上凹腔镜，并将准直用的辅助激光器(He-Ne 内腔激光器)放置于凹腔镜一侧，并留出适当距离，通过直接观察光点的方法调节 He-Ne 准直激光器的出射光束的高低、左右方向，使光点位于凹腔镜的中心。

(3) 取下凹腔镜，放上平腔镜，调节 He-Ne 准直激光器的高低、左右方位调节钮，使激光打在平腔镜的中心。

(4) 再放上凹腔镜后，光点会有微小移动，再调节 He-Ne 准直激光器的出光方向，让光继续打在凹腔镜中心处。

(5) 取下凹腔镜，继续调节 He-Ne 准直激光器的出光方向让光点落在平腔镜的中心。



(6) 反复几次后，使光点同时落在凹腔镜和平腔镜的中心。必要时，可以稍微移动槽钢靠 He-Ne 准直激光器的左右位置。

2. 调整直腔 He-Ne 激光器(图 1-4.18)

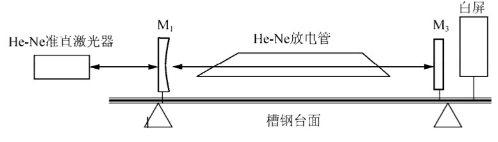


图 1-4.18　调整直腔 He-Ne 激光器

(1) 取下凹腔镜和平腔镜，在平台尾端放上白屏，放上长 He-Ne 放电管。

(2) 用纸片放置在放电管的前后端，观察光斑，粗调放电管的前、中、后 3 个调节架；调整 He-Ne 放电管入光这一端的调节架的上下左右，让光斑在入射窗面中心处，并让放电管内管尽可能不发红，最暗，表示准直光全部进入内管轴线，而没有倾斜。

(3) 调节 He-Ne 放电管后端，通过白屏观察光斑，调整放电管中间和尾端的调节架，使白屏上的光斑集中，白屏位置由近及远放置，并同时多次调节放电管，此时需结合头端、中间和尾端的调节架进行调节，最后在白屏上得到一个又圆又亮的均匀的光斑。

(4) 调节架上放上压片，进行放电管的固定。

(5) 固定放电管后，如果白屏的光斑不集中，再进行微调放电管的前、中、后 3 个调节架，使白屏上的光又圆又亮，表示准直激光水平穿过放电管中心，如图 1-4.19 所示。



图 1-4.19　直谐振腔的调节

(6) 接入-长 He-Ne 放电管的电极，锁紧电阻板，开机前检查线路。

(7) 先放上平腔镜，调节平腔镜二维俯仰旋钮，让平腔镜的反射光进入放电管。可用纸片放置在放电管面向平腔镜的端面(出端)上，观察入射和反射光斑。挡住一半的光斑，粗调平腔镜架，让两个光斑重合。观察 He-Ne 准直激光器的出射窗口的光斑，调节平腔镜的左右、上下镙钉，让反射光斑进入窗口。

(8) 再将纸片放置在放电管面向 He-Ne 准直激光器这一端(入端)的垂直下方(即放置在槽钢平台上)，可以观察到纸片上有两个亮点和一个大的散斑，调节平腔镜的左右上下二维

俯仰旋钮使纸片上的散斑会聚为两个亮点，并且两点干涉闪烁。说明平腔镜与 He-Ne 准直激光器的输出镜形成了谐振腔。

(9) 打开 He-Ne 放电管电源，电流固定在 13～15mA。

(10) 放上凹腔镜，调节凹腔镜，先让凹腔镜的反射光进入 He-Ne 准直光源的出射窗口，再在此位置附近继续调节凹腔镜的上下左右，使出现激光，如图 1-4.20 所示。

(11) 用功率计测量此时输出光的功率，依次调节凹腔镜、平腔镜，使光功率最大，约为 25～30mW，中间可以用棉花蘸取酒精和乙醚 1∶1 的混合液体擦拭放电管两端的布儒斯特窗镜面。

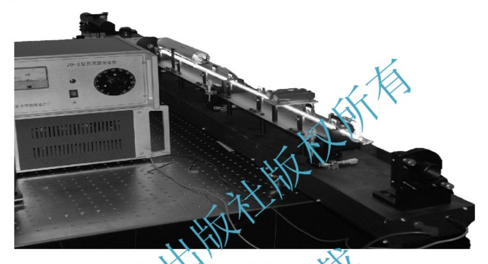


图 1-4.20 直腔输出激光

3. 声光锁模

(1) 声光调制器放置在平腔镜 M_3 后面，用 M_3 镜输出的激光束调节声光调制器的方位，使光束以布儒斯特角入射并通过声光介质的中部，如图 1-4.21 所示。

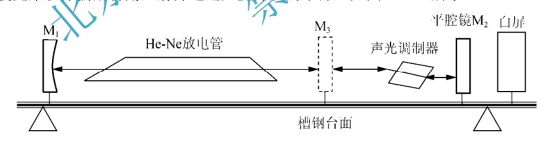


图 1-4.21 声光调制

(2) 连接声光电源的功率输出端和声光调制器。

(3) 打开声光电源，频率为 44.2MHz，电流调节至最大，观察白屏上的拉曼—奈斯衍射图像，通过左右转动声光调制器下面的磁性底座，改变光束入射声光调制器角度，并改变声光调制频率，在光屏上观察到 0 级、±1 级、±2 级衍射光如图 1-4.22 所示。若衍射光强不对称，可调节调制器支架下两个正交的调平螺丝，测量各级衍射光的衍射角度，并测出 0 级光束的衍射效率(或调制度)与电功率的关系曲线，数据填入表 1-4.1 中。



图 1-4.22　拉曼—奈斯衍射光斑

(4) 关闭声光电源，在声光晶体输出端加入另一平镜 M_2(后平镜)，两者紧挨，用 M_3 镜输出的激光调节 M_2 镜，使光束沿原路返回。调节后平镜 M_2 的上下左右调节架，使白屏上的亮点重合并闪烁。

(5) 取下平腔镜 M_3，看是否有 He-Ne 光产生，如无，则松开声光调制器架下的磁性开关，左右稍微调一下，使产生激光，再通过适当调节声光调制器的俯仰和左右平移(注意不调其前后钮)，使输出激光功率增大，调节凹镜和后平镜构成谐振腔，还可以适当调节后平镜，使出光功率达到 2mW 及 3mW 以上，约为 4mW。

4. 观察与测量

用扫描干涉仪观察激光器输出纵模频谱，搭建光路，如图 1-4.23 所示，并比较锁模前后频谱的变化(纵模个数，强度及稳定性)。



图 1-4.23　激光器纵模输出频谱观察光路

(1) 在平腔镜 M_2 后面放置平面全反镜，将 He-Ne 激光反射一个方向，进入 F-P 共焦腔，调共焦腔的高度方位，使输出的两个光斑重合(用白纸观察)，进入光电接收器(F-P 共焦腔和光电接收器挨近)，打开声光调制电源，改变调制频率和功率，用示波器观察模式波形，数据填入表 1-4.2 中。系统的光路和电信号连接如图 1-4.24 所示。

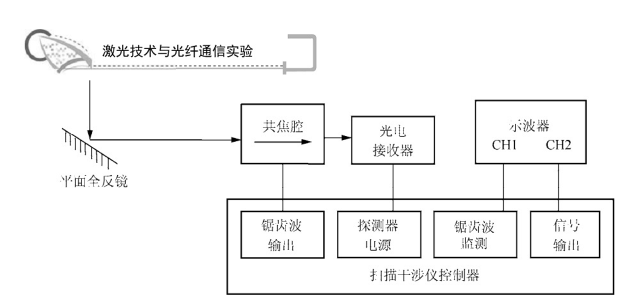


图 1-4.24　声光锁模观察与测量

(2) 示波器的 CH1 为锯齿波，示波器选择触发源为 CH1，即锯齿波。

改变调制频率和功率(电流)，用示波器观察锁模波形。若频率没锁上，示波器观察到的是杂乱的正弦波。锁住频率时，示波器看见稳定的固定的几个峰，峰越多越好，一般不止一个峰。

图 1-4.25 给出在本实验装置中实现锁模后，用扫描干涉仪系统获得的激光锁模频率谱，锁住约 15 个纵模。

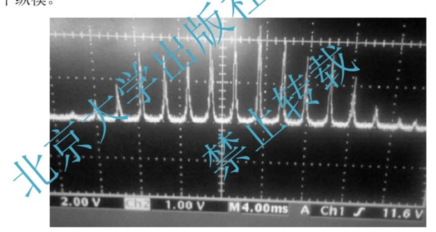


图 1-4.25　633nm 激光锁模频率谱

锁定频率后，可以测纵模间距。已知共焦腔的自由光谱区为 2.5GHz。

注：腔长越长，模式越多，但是腔长长了，难出激光；腔长越短，模式越少，但是容易出激光。

(3) 加上标准镜(选模、选频)，只出现一个模式光(单纵模)，调其左右上下俯仰角，被选模式变化，示波器中单峰波形左右移动。

六、注意事项

(1) 调整 He-Ne 放电管的前后螺钉时，注意不要用力过大，将管子弄破。

(2) 调整光路时，注意手不要触摸到 He-Ne 放电管的电极，防止触电。

(3) 绝对避免激光束直射人眼。



(4) 光学镜片是非常易损的光学元件，绝对避免用手触、摸、刮。

(5) 用棉花蘸取酒精和乙醚 1∶1 的混合液体擦拭布儒斯特窗。

七、实验数据与分析

表 1-4.1　拉曼—奈斯衍射测量数据

各级衍射光	*d*/m	*L*/m	*θ*/rad
+2 级			
+1 级			
-1 级			
-2 级			

表 1-4.2　声光锁模测量数据

腔长/mm	锁定频率/MHz	锁模个数	重复周期/ms	纵模间距/μs	脉冲半高宽度/μs

八、思考题

(1) 超声场有驻波场和行波场之分，它们有什么区别？各应用在什么装置中？分别举例说明。

(2) 声光衍射系统为什么有一个衍射效率最高的中心频率？中心频率由哪些因素决定？

(3) 试述声光衍射器件的应用。

实验 5

Nd:YAG 电光调 Q 激光的参数测量

一、实验目的

(1) 掌握 Nd:YAG 电光调 Q 激光的工作原理和器件的结构。

(2) 了解谐振腔参数及调节精度对激光器性能的影响。

(3) 掌握 Nd:YAG 激光器的调节技能。

(4) 掌握电光调 Q 固体激光器主要输出参数的测试方法。



二、实验内容

(1) 调整光路，使输出激光脉冲，并尽可能使其工作在最佳状态。

(2) 测量脉冲 Nd:YAG 激光器的输出特性曲线，测出光泵能量阈值，算出激光器的总体效率等参数。

(3) 测量电光调 Q 脉冲的峰值功率、脉冲能量和脉冲宽度。

(4) 和频实验，输出 355nm 激光。

三、实验原理

(一) 电光调 Q 的 Nd:YAG 激光器

Nd:YAG 激光器是一种固体激光器，主要由激光工作物质、激励泵浦、聚光腔和光学谐振腔组成，此外还可能包括调 Q 开关、起偏器、倍频晶体和相关的电源电路等，如图 1-5.1 所示。

Nd:YAG 激光器的工作物质是掺钕钇铝石榴石晶体(Nd^{3+}:$Y_3Al_5O_{12}$， Nd:YAG)，是在作为基质的钇铝石榴石晶体中的 Y^{3+} 被激活离子 Nd^{3+} 取代形成。

Nd:YAG 激光器在光泵的作用下主要产生 1064nm 的激光，Nd^{3+}离子产生受激辐射的能级如图 1-5.2 所示，在光泵激励下，处于基态 E_1 的钕离子吸收光泵发射的相应波长的光子能量后跃迁到 E_4 能带，E_4 为大量能级组成的能带。由于 E_4 能带寿命很短，处于 E_4 能带的钕离子很快以无辐射跃迁的形式跃迁到 E_3 能级，E_3 是亚稳态，具有较长的能级寿命，钕离子可以在 E_3 上积累起来。由于 E_3 直接向基态 E_1 跃迁的概率很小，E_3 上的钕离子主要向 E_2 能级跃迁，再由 E_2 经无辐射跃迁返回基态 E_1。

所以，Nd:YAG 激光器是一个典型的四能级系统，它具有量子效率高、受激辐射截面大，且热导率较高，易于散热，不仅可以单次脉冲运转，还可以高重复频率或连续运转。



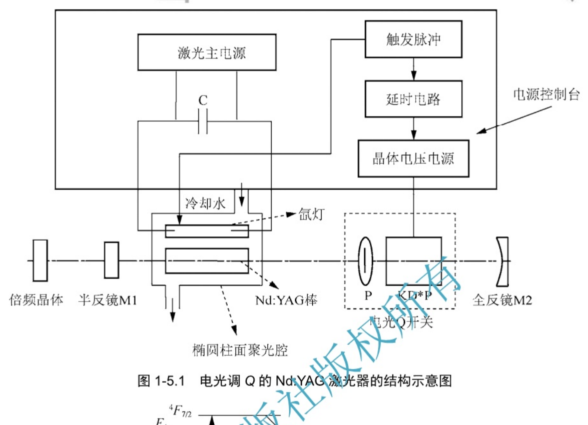


图 1-5.1　电光调 Q 的 Nd:YAG 激光器的结构示意图

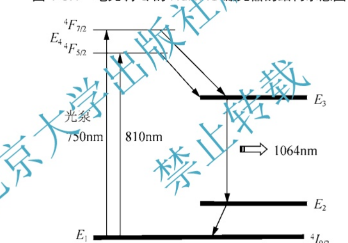
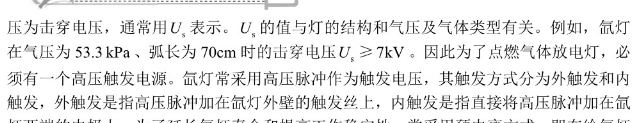


图 1-5.2　Nd:YAG 晶体中 Nd^{3+}的能级图

(二) Nd:YAG 激光器的光泵系统

Nd:YAG 激光器的光泵浦方式主要是惰性气体放电灯(氙灯、氪灯)和半导体二极管激光器。惰性气体放电灯是常规固体激光器最为广泛使用的泵浦光源，灯内充满氙或氪等惰性气体，按工作方式不同，可以分为脉冲灯和连续灯。氙灯就是一种脉冲灯，主要用于低频率工作的 Nd:YAG 激光器的光泵源。氪灯是一种连续灯，主要用于高频率工作或连续工作的 Nd:YAG 激光器中。

本实验的 Nd:YAG 激光器采用的是氙灯作为泵浦源。氙灯是一种亮度较高的非相干辐射源，有高的电-光转换效率(70%)和从紫外到红外(0.2～1.8μm)宽的辐射范围。对于气体放电灯，只有两端所施加的电压达到一定值时，气体开始放电。将气体开始电离放电的电



压为击穿电压，通常用U_s表示。U_s的值与灯的结构和气压及气体类型有关。例如，氙灯在气压为53.3 kPa、弧长为70cm时的击穿电压$U_s \geqslant 7\text{kV}$。因此为了点燃气体放电灯，必须有一个高压触发电源。氙灯常采用高压脉冲作为触发电压，其触发方式分为外触发和内触发，外触发是指高压脉冲加在氙灯外壁的触发丝上，内触发是指直接将高压脉冲加在氙灯两端的电极上。为了延长氙灯寿命和提高工作稳定性，常采用预电离方式，即在给氙灯触发脉冲之前，先给氙灯一个高电压、低电流的预燃电压，使氙灯初始电离，然后再给氙灯一个高压触发脉冲，使氙灯击穿放电。

通常，Nd:YAG晶体被加工成ϕ6mm、长80mm左右的棒状，两端磨成光学平面，平面的法线与棒轴有一个小夹角，面上镀有增透膜。棒的侧面全部“打毛”，以防止寄生振荡。激发泵浦用的氙灯或氪灯做成和YAG棒长度相近的直管型，以便与棒达到最佳的配合。为了有效地利用灯的光能，把棒和灯放在一个内壁镀金的空心椭圆柱面聚光腔中，它们各占据椭圆柱的一根焦线。图1-5.3表示了这一结构，通过聚光腔可以提高泵浦光的转换效率和提高泵浦光辐照均匀性。

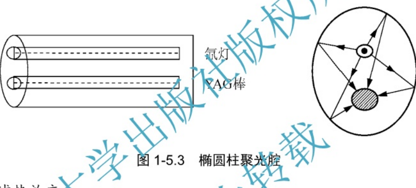


图1-5.3　椭圆柱聚光腔

(三) 光泵浦热效应

无论脉冲工作或连续工作的固体激光器，输入的总能量中只有少部分转变为激光输出，其余能量中相当多部分都变成热耗散掉了。产生热的原因如下。

(1) 泵浦带和激光上能级间的能量差以热的形式散逸到基质中，引起所谓的量子亏损热。

(2) 类似地，激光下能级和基态间的能量差也会产生热耗散。

(3) 包含在激光跃迁内的荧光过程的量子效率小于1，因猝灭机制会产生热。

(4) 弧光灯或闪光灯的宽带泵浦光中，分布在紫外和红外谱带的成分被基质吸收后转变成热。

固体激光器的光泵浦热效应严重妨碍了激光输出功率(能量)的进一步提高，并使光束的质量劣化，因此必须采取措施消除或减小热效应。常用的补偿光泵浦固体激光器热效应的措施有：冷却、滤光、光学补偿和采用非圆柱形工作介质等。

使用流动液体冷却剂带走泵灯、激光介质和聚光腔中沉积的热量是一般使用的冷却方式。最常用的冷却液是水，它的优点是热容量大，热导系数大，体胀系数小，黏度小，化学性能稳定，不易被强紫外辐射分解，是一种使用方便、价格低廉的冷却液。但是自来水中含有杂质，沉淀后易污染激光元器件并堵塞管道，故需用蒸馏水或去离子水。水中还要溶入适量的重铬酸钾和亚硝酸钠，做成滤光液，或在YAG棒的周围套上滤紫外玻璃管，



以滤除氙灯光谱中的紫外成分，减小紫外辐射对工作物质的危害。

(四) 谐振腔

为了形成激光振荡，把 Nd:YAG 棒置于一定的谐振腔构型之中。一般采用平凹稳定腔或虚共焦非稳腔。由于 Nd:YAG 的单程激光增益很高，作为激光输出口的前腔镜 M_1 可设计成具有百分之几十的透过率，甚至可以是一块“白片”。后腔镜 M_2 则是全反射镜。

(五) 激光器调 Q 技术

普通脉冲固体激光器的激光脉冲并不是一个光滑的光脉冲，而是由许多振幅、脉宽和脉冲间隔作随机变化的尖峰脉冲组成的，如图 1-5.4 所示，这种现象称为激光器的弛豫振荡。产生弛豫振荡的原因是：当激光器的工作物质被泵浦，上能级的反转粒子数超过阈值条件时，就产生激光，随着激光的发射，上能级粒子数大量被消耗，导致反转粒子数降低，当低于阈值时，激光振荡停止。这时，由于泵浦光的继续抽运，上能级反转粒子数重新积累，当超过阈值时，又产生第二个脉冲，如此不断重复上述过程，直到泵浦停止才结束。可见，每个尖峰脉冲都是在阈值附近产生的，因此脉冲的峰值功率较低。即使增大泵浦能量也不能提高峰值功率，只会使小尖峰增加。

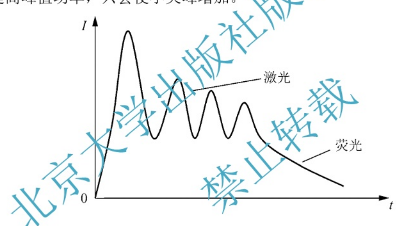


图 1-5.4　脉冲固体激光器输出的尖峰激光

调 Q 技术是获得短脉冲高峰值功率激光输出的重要方法。一般情况下，自由运转的脉冲激光器输出的激光脉冲的脉宽为几百 μs 到几 ms，峰值功率也较低。为了获得高峰值功率的激光输出，人们发明了调 Q 技术。

即按一定的方式改变激光谐振腔的品质因素(Q 值)。通常，在谐振腔内置入一个光开关，从氙灯引燃到其瞬时光强达到极大的期间这个光开关是关闭的。因此对光的传播而言，腔内有很大的损耗(低 Q 值)，此时的谐振腔不能产生激光振荡，或激光振荡的阈值非常高。与此同时，YAG 棒中的能级粒子数反转却不断的增大，当氙灯的光强达到极大值时，粒子数反转也达到了极大。如果这时光开关被打开，使腔处于低损耗(高 Q 值)状态，腔的振荡阈值迅速下降，激发态上的 Nd^{3+} 离子便会以极快的速度在很短的时间内跃迁回基态，同时发射出相应频率的光子。光学谐振腔保证了光场的相干增强，最终形成一个持续期极短、峰值功率极高的激光脉冲。

作为一个对比，用不调 Q 的脉冲激光器产生的激光脉冲，其脉宽约为 100μs 量级，而

调 Q 激光器产生的激光脉冲脉宽仅为 10μs 左右。如果脉冲的总能量为 1J，不调 Q 脉冲的峰值为 10mW 左右，而调 Q 脉冲的峰值功率可达到 100mW 左右。

谐振腔的损耗 γ 一般包括反射损耗、吸收损耗、衍射损耗、散射损耗和输出损耗等。用不同的方法去控制不同的损耗就形成了不同的调 Q 技术，如控制反射损耗的有转镜调 Q 技术和电光调 Q 技术，控制吸收损耗的可饱和吸收体调 Q 技术、控制衍射损耗的声光调 Q 技术、控制输出损耗的透射式调 Q 技术等。

本实验主要研究灯泵固体激光器的电光调 Q 技术，所用的 Q 开关利用晶体的电光效应制成，具有开关速度快、脉冲峰值功率高、脉冲宽度窄、器件输出功率稳定性较好等优点，是一种已获广泛应用的调 Q 技术。

1. KD*P 晶体的纵向电光效应

本实验所用的电光晶体为 KD*P 晶体，属于四方晶系 $\bar{4}2m$ 晶类，光轴 C 与主轴 z 重和，未加电场时，在主轴坐标系中 KD*P 晶体的折射率椭球方程为

$$\frac{x^2+y^2}{n_o^2}+\frac{z^2}{n_e^2}=1 \tag{1-5.1}$$

式中：n_o、n_e 分别为寻常光和异常光的折射率。加电场后，由于晶体对称性的影响，$\bar{4}2m$ 晶类只有 γ_{63}、γ_{41} 两个独立的线性电光系数。γ_{63} 是电场方向平行于光轴的电光系数，γ_{41} 是电场方向垂直于光轴的电光系数。KD*P 晶体外加电场后的折射率椭球方程为

$$\frac{x^2+y^2}{n_o^2}+\frac{z^2}{n_e^2}+2\gamma_{41}(E_x yz+E_y xz)+2\gamma_{63}xy=1 \tag{1-5.2}$$

当只在 KD*P 晶体光轴 z 方向加电场时上式变成：

$$\frac{x^2+y^2}{n_o^2}+\frac{z^2}{n_e^2}+2\gamma_{63}E_z xy=1 \tag{1-5.3}$$

经坐标变换，可求出此时在 3 个感应主轴上的主折射率：

$$\begin{aligned} n_x' &= n_o-\frac{1}{2}n_o^3\gamma_{63}E_z \\ n_y' &= n_o-\frac{1}{2}n_o^3\gamma_{63}E_z \\ n_z' &= n_e \end{aligned} \tag{1-5.4}$$

当光沿 KD*P 光轴 z 方向传播时，在感应主轴 x'，y' 两方向偏振的光波分量由于晶体在这两者方向上的折射率不同，经过长度为 l 的晶体后产生位相差：

$$\delta=\frac{2\pi}{\lambda}(n_{y'}-n_{x'})l=\frac{2\pi}{\lambda}n_o^3\gamma_{63}V_z \tag{1-5.5}$$

式中：$V_z=E_z l$ 为加在晶体 z 向两端的直流电压。

使光波两个分量产生相位差 $\pi/2$（光程差 $\lambda/4$）所需要加的电压为

$$V_{\pi/2}=\frac{\lambda}{4n_o^3\gamma_{63}} \tag{1-5.6}$$

KD*P 晶体的电光系数 $\gamma_{63}=23.6\times10^{-12}\,\mathrm{m/V}$。对于 $\lambda=1.06\mu\mathrm{m}$、KD*P 晶体的 $V_{\pi/2}=4000\mathrm{V}$ 左右。



2. 带起偏器的电光调 Q 原理

带起偏器的 KTP 电光 Q 开关是一种应用较广泛的电光晶体调 Q 装置，实验装置如图 1-5.5 所示。KD*P 晶体具有纵向电光系数大，抗破坏阈值高的特点，但易潮解，故需要放在密封盒子内使用。通常采用纵向方式，即 z 向加压，z 向通光。

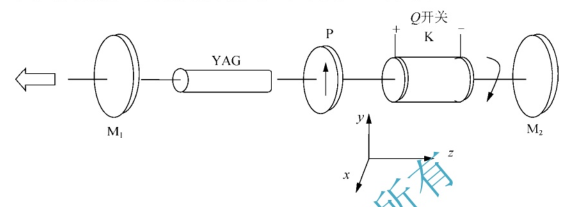


图 1-5.5　带偏振器的电光调 Q 装置

图 1-5.5 中，P 为偏振器，它使腔内的激光振荡具有起偏器允许通过的偏振方向，一般选为垂直方向。K 为电光晶体，它的种类很多，但用得最多的是 KD*P(磷酸二氘钾)人造单晶。电光调 Q 过程是：YAG 晶体在氙灯的光泵下产生非偏振光，通过偏振器后，变为线偏振光，偏振方向为 y 方向，如果调 Q 晶体上没有加任何电压，则光通过调 Q 晶体后，偏振态不发生任何变化，经过全反射镜后，再次通过调 Q 晶体(偏振态不发生变化)和偏振器，此时电光 Q 开关处于“打开”状态。

如果调 Q 晶体上加有 $\lambda/4$ 电压，则沿 y 方向偏振的线偏振光通过调 Q 晶体后，线偏振光的偏振方向将改变 45°，被全反镜反射回来，再次通过调 Q 晶体后，偏振方向再偏转 45°，达到偏振器后，线偏振光的偏振方向与偏振器的偏振方向相差 90°，因此该线偏振光不能通过偏振器，此时电光 Q 开关处于“关闭”状态。因此在氙灯刚开始点燃时，先在调 Q 晶体上加 $\lambda/4$ 电压，使谐振腔处于“关闭”的低 Q 值状态，阻断激光振荡的形成，待激光上能级反转的粒子数积累达到最大值时，突然撤去调 Q 晶体上的 $\lambda/4$ 电压，使激光器瞬间处于高 Q 值状态，于是产生雪崩式的激光振荡，输出一个巨脉冲。

由电光调 Q 的基本原理知，要获得高效率调 Q 的关键之一是精确控制 Q 开关“打开”的延迟时间。即从氙灯点燃开始延迟一段时间，当工作物质上能级反转的粒子数达到最大时，立即“打开”开关的效果最好。如果 Q 开关打开早了，上能级反转粒子数尚未达到最大时就开始起振，那么输出的巨脉冲功率会降低，而且还可能出现多脉冲。如果延时过长，即 Q 开关打开得迟了，那么由于自发辐射等损耗，也会影响巨脉冲的功能。

如何撤去调 Q 晶体上的 $\lambda/4$ 电压呢？通常是利用带有辅助电极的火花隙放电装置，瞬时将加在电光晶体的电压对地短路来实现谐振腔的 Q 值变化。其装置简图如图 1-5.6 所示。

对于图 1-5.1 所示的激光器，其工作过程是：①先开主电源对储能电容 C 充电；②给调 Q 晶体加 $\lambda/4$ 电压，使谐振腔处于关闭状态；③产生一个触发尖脉冲，一方面使主电源停止对 C 充电，另一方面该触发脉冲送到氙灯的触发电路点燃氙灯，泵浦 YAG 棒，使反转粒子数大量积累。延迟一段时间后，该触发脉冲再送到调 Q 晶体的放电管上，撤掉其 $\lambda/4$

电压，使谐振腔的 Q 值突增，形成激光振荡，输出激光巨脉冲。可以通过实验，精确调节延时电路，直到输出激光最强为止。

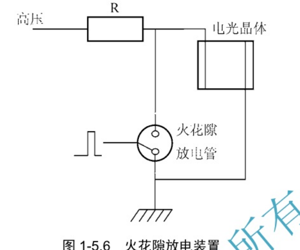


图 1-5.6　火花隙放电装置

(六) 固体激光器的倍频技术

光波电磁场与非磁性透明电介质相互作用时，光波电场会会引发介质的极化现象。当强激光产生后，由此产生的介质极化已不再是与场强呈线性关系，而是明显的表现出二次及更高次的非线性效应。倍频现象就是二次非线性效应的一种特例。本实验中的倍频就是通过倍频晶体实现对 Nd:YAG 输出的 1064nm 红外激光倍频成 532nm 绿光。

常用的倍频晶体有 KTP、KDP、LBO、BBO 和 LN 等。其中，KTP 晶体在 1064nm 光附近有高的有效非线性系数，导热性良好，非常适合用于 YAG 激光的倍频。KTP 晶体属于负双轴晶体，对它的相位匹配及有效非线性系数的计算，已有大量的理论研究，通过 KTP 的色散方程，人们计算出其最佳相位匹配角为：$\theta = 90°$，$\phi = 23.3°$，对应的有效非线性系数 $d_{\mathrm{eff}} = 7.36 \times 10^{-12}\,\mathrm{V/m}$。

倍频技术通常有腔内倍频和腔外倍频两种。腔内倍频是指将倍频晶体放置在激光谐振腔之内，由于腔内具有较高的功率密度，因此较适合于连续运转的固体激光器。腔外倍频方式指将倍频晶体放置在激光谐振腔之外的倍频技术，较适合于脉冲运转的固体激光器。本实验系统采用腔外倍频技术。

四、实验仪器设备

准直激光器(氦氖激光器或者半导体激光器)	Nd：YAG 棒	氙灯
聚光腔	激光控制电源	电光晶体
起偏器	全反镜	半反镜
倍频晶体	和频晶体	调整架
能量计	光电探测器	示波器
循环水冷却系统		

五、实验步骤

1. 按图 1-5.7 所示组织实验系统

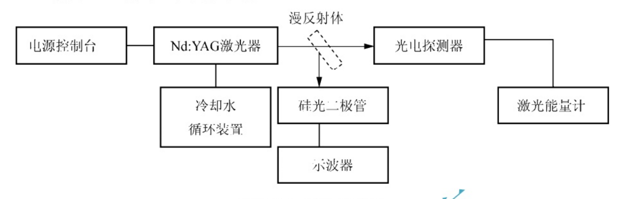


图 1-5.7 实验装置简图

(1) 电源控制台中包含如下几部分。

① 大功率高压直流电源。它是为点燃氙灯用的，给储能电容充电，储能电容电压在 0～1.1kV 的范围内可以连续变化，功率容量在 kW 的量级。利用市电整流所获得的直流电能对一个储能电容器充电，然后通过短暂而重复地导通可控硅元件或闸流管，使电容器对氙灯放电，从而得到强烈的闪光来泵浦 YAG 棒。在我们的系统中，储能电容器的容量为50μF，氙灯的重复频率为 1Hz、5Hz、10Hz、20Hz、40Hz。

② Q 开关高压电源。它为电光晶体提供 $\lambda/4$ 电压。这个电源的功率容量不需要很大，所以它是利用高频(数十千赫兹)振荡的方式把低压直流电流变为高频高压，再经整流形成直流高压供电光晶体使用。它的电压也可以在一定的范围内调节，以便适应不同材料的电光晶体和不同的激光波长。

③ 触发脉冲发生器。用以产生触发氙灯点燃和 Q 开关导通所需的两组电脉冲。这两组电脉冲出自同一个脉冲发生器，因而是相互严格同步的。但是它们之间的相对延时可以调节，以便恰好在氙灯点燃一段时间(100μs 量级)之后，YAG 棒的粒子数反转达到极大时打开 Q 开关，从而得到脉宽最窄、峰值功率最大的调 Q 激光脉冲。最佳的延时量随着氙灯放电能量的不同而有所变化。

(2) 冷却水循环装置包括下列两个部分。

① 内循环水路。用离心水泵使掺有重铬酸钾的蒸馏水或去离子水在水箱和 YAG 的椭圆反光镜密封水套之间不断循环，将氙灯和 YAG 棒产生的热量带到水箱中，而水箱的储热则由下面将要叙述的自来水冷却水路带到周围环境中。水泵的开关和电源控制台的总开关有联动的关系。仅在水泵正常运行的条件下，电源控制台才能被接通，这样就保证了氙灯和 YAG 棒的安全工作。

② 自来水冷却水路。令自来水以适当的流量流过放在上述去离子水水箱中的蛇型铜管——热交换器，使水箱降温。自来水入口处设有水压继电器，如果自来水的压力不够，不能保证热交换器有足够的冷却效率，则整个激光器的供电系统亦不能被启动。同时，在激光器的运行过程中，如果发生断水或水压下降，水压继电器也会自动将电源切断并发出报警信号。

2. 调节准直光路

(1) 打开准直激光电源开关(机箱后面)，拿掉前、后腔镜和偏振片等，只剩下准直激光器和 Nd:YAG 棒。

(2) 调节准直激光器的上、下、左、右按钮，让准直光通过 Nd:YAG 棒的入口中心处入射，调节准直激光器的俯仰角度，让准直光从 YAG 棒的出口中心出射。(准直激光调整架为四维可调)

(3) 加上前腔镜(出射端平腔镜，反射率<100%)，通过调整前腔镜让反射光斑回到准直激光的出射窗口中心。

(4) 加上后腔镜(平腔镜，全反，反射率 100%，靠近准直光源)，调整后腔镜俯仰，让反射光回到准直光源的出射窗口中心。

(5) 遮盖准直光源入口，或关闭准直激光电源。

3. 调节系统光路(见图 1-5.8)，使输出最佳的连续激光、调 Q 激光、倍频激光和频激光

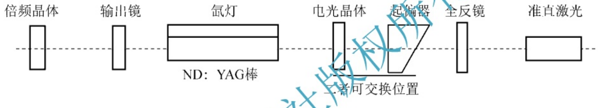


图 1-5.8 系统光路调整

(1) 开机前检查控制电源：看一下 SIMMER、WORK 按钮是否弹起，OFF 按钮是否按下，若不是，则按下按钮，使其满足这个条件后再开钥匙。

(2) 打开水循环开关，水泵开始工作。

(3) 依次打开钥匙 on，待显示稳定后，再按预燃 SIMMER，(氙灯预燃，高压上千伏，氙灯两端可见蓝光，继电器响一声吸合上，若噼啪噼啪响，表示预燃不上)SIMMER 灯亮，FreQ 灯闪。

(4) 按 WORK 键，调整电压(Charge Volt)到 300V 以上，一般为 500～600V，用能量计测输出激光的能量，微调前后腔镜的方位和俯仰角，使激光能量最大(400mJ 左右)。

(5) 腔内加入偏振片(靠近后腔镜，布儒斯特角 56.5°)，锁紧座子前，左右稍微晃动座子，使输出激光能量最大，再锁紧座子。两个镙钉固定上的，松开一个镙钉，微调布儒斯特角，观察输出能量，使能量输出最大(比加前能量下降 20%左右)，固定偏振片的两个镙钉。(微调偏振片角度，使光功率最大，约为 270mJ，最大 300mJ)

(6) 加入电光晶体，在锁紧座子前，微晃座子，使能量最大，(比加之前下降 30%左右)，再微调二维钮，使能量最大。按下 HV 钮，给电光晶体加 1/4 波长电压(3800V)，转动晶体方向，或改变俯仰角，使能量最小(10mJ～20mJ)，再微调晶体二维钮，使能量在几 mJ。再退高压(按 OFF 按钮)。若能量降不下来，重调偏振片的位置与方向，使能量尽可能大，再重复前面(5)、(6)两步。

(7) 加上倍频晶体，旋转倍频晶体，使输出绿光功率最大。

4. 激光阈值电压的测量

(1) 打开总电源钥匙，水泵工作。

(2) 按下 He-Ne 开关，He-Ne 激光器工作，出现红色指示光，调整光电探测器高度和



硅光二极管高度，使激光打在中心。

(3) 将 YAG LASER POWER 钥匙打在“ON”状态，YAG 电源工作。

(4) 按下 SIMMER 钮，再按下 WORK 按钮，YAG 棒工作。调节 CHARGE VOLT 电压(储能电容的充电电压)到零，用光电探测器和能量计测量激光能量，然后缓慢增加电压，当能量计刚有非零读数时，此时的电压即为激光器的阈值电压。

5. 静态激光特性测量

(1) 从 700V 开始，以 25V 的电压增量测出 12 个电压值相应的激光输出能量 E_o 。每个电压点氙灯的注入能量为

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2}CV^2$$

式中：储能电容 $C = 50\mu F$ ；V 为氙灯电压。

列出 E_o 和 ε_i 的数据表，并做 $E_o - \varepsilon_i$ 关系曲线，并求出各点的转换效率 $\eta = {E_o}/{\varepsilon_i}$ 。将结果填入表 1-5.1 中。

表 1-5.1　静态激光输出能量及输出效率

电压/V												
E_o /mJ												
ε_i /mJ												
η /(%)												

(2) 观察不调 Q 激光脉冲波形。把激光打在一个漫反射体上，用硅光二极管探测小部分漫射激光，仔细调节示波器上的相应旋钮，使屏幕上出现激光脉冲。此时的激光脉冲应是一连串不规则的尖峰，把屏幕上的波形拍摄下来，记下峰的高度、单峰的时间宽度和相邻两峰之间的时间间隔以及整个尖峰串的持续时间。思考尖峰串结构的形成原因和变化规律。

6. 动态激光(调 Q 激光)的特性测量

(1) 按下调 Q 状态选择的关门工作状态“HV”键，调节晶体高压调节电位器，使激光输出为 0。

(2) 按下调 Q 状态选择的动态工作状态的“ON”按钮，调节退高压延时调节电位器 DELAY 旋钮(退高压信号延时调节)，选择最佳延时(氙灯电压一定，改变延时，使激光能量最大的延时即为最佳延时)，激光输出最大，示波器上出现单峰的较好的调 Q 激光脉冲波形。

(3) 在调 Q 状态下，用示波器测出泵浦电压为 700～1000V(每隔 25V)的激光脉冲峰值和脉冲半高宽度，并用激光能量计测出激光能量，并将数据填入表 1-5.2。

表 1-5.2　调 Q 激光脉冲波形的参数值

电压/V	脉冲峰值/V	脉冲半高宽度/ns	激光能量/mJ

续表

电压/V	脉冲峰值/V	脉冲半高宽度/ns	激光能量/mJ

(4) 先求出泵浦能量 $\varepsilon=\frac{1}{2}CV^2$，作出脉冲峰值、脉冲半宽、激光能量随泵浦能量的变化点图。

(5) 总结上述测得各参量变化趋势。

7. 和频实验

(1) 调整调 Q 激光输出能量在 80mJ～100mJ。

(2) 在光路中安装 LBO 晶体，晶体投射光中安装 355nm 高反镜，旋转 LBO 晶体，观察反射光点在白纸上的颜色变化，直到看到蓝紫色光输出。

8. 关机顺序

按 OFF 按钮，退 1/4 波长电压。降低 Charge Volt 电压，按 WORK 按钮，等电压降为 50V 以下，再按 SIMMER 按钮，关钥匙，等 2～3min，再关循环水。

六、注意事项

(1) 在使用激光器之前，必须检查冷却水管，不能弯折。

(2) 本实验中产生的激光脉冲可灼伤皮肤、使人眼永久致盲。决不可以令皮肤接触激光束。用肉眼直视激光束(即迎着激光束射来的方向看)是绝对错误之举。

(3) 实验人员未经授课教师明确表示同意之前不得开始进行实验。

(4) 如果放置一段时间后，激光器的输出变差，则需要微调激光器的光路，具体方法如下。

① 反复调整使红色 He-Ne 指引光通过偏振片后，从 YAG 晶体棒的中心穿过，可以用半透明的白纸贴于 YAG 晶体导管的两端进行观察。

② 调节半反镜、全反射膜片和调 Q 元件，使它们透过的红色光斑重合。

③ 打开激光电源，用曝光像纸在激光输出端观察，反复调整全反或半反膜片，使激光打在像纸上的光斑最圆颜色最深。

④ 当要调 Q 时，如果按下调 Q 状态选择的关门工作状态“HV”按键，调节晶体高压调节电位器，使激光输出不能关断，就必须转动调 Q 的方向，直到能关断为止。

⑤ 当要输出 0.532μm 激光时，需放入倍频晶体和滤光片，分别调节倍频晶体和滤光片，使绿色激光光斑最圆颜色最深。



七、实验数据与分析

(1) 激光器的阈值电压是____________。

(2) 绘出 $E_o - \varepsilon_i$ 关系曲线。

(3) 绘出脉冲峰值、脉冲半宽、激光能量随泵浦能量的变化曲线图。

八、思考题

(1) 总结静态激光和动态激光测得的各参量变化趋势，并解释其原因。

(2) 为什么调 Q 时，增大激光器谐振腔内损耗同时能使上能级粒子反转数积累增加？

(3) 为什么改变退压延迟时间和加在调 Q 晶体上的电压值会影响调 Q 激光器的输出？

附：仪器介绍

(一) 控制电源的前、后面板示意图(图 1-5.9、图 1-5.10)



图 1-5.9　电源箱前面板结构图



图 1-5.10　电源箱后面板结构图

说明：

电箱：开关旋钮，旋转到“ON”状态电箱通电水泵进行抽运工作让水循环。

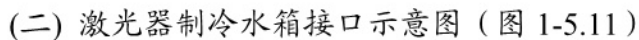
预燃键：工作之前按下它，工作时始终让其处在按下状态。其作用是给氙灯加载上电压。

工作键：在谐振腔调谐好后，按下工作键，允许氙灯闪烁工作，产生激光。

“OFF”键：按下此键激光处于静态输出光状态，即输出的光虽然会通过调 Q 晶体但此时晶体不进行调 Q，输出的是连续光。

“HV”键：按下它使调 Q 晶体两端加载高压，让腔内产生高损耗使能量在腔内积累而输出低能量光。

“ON”键：按下它调 Q 晶体开始对静态激光调 Q，即让谐振腔输出巨脉冲光(动态光)。闪灯选挡，选择氙灯闪烁频率。


(二) 激光器制冷水箱接口示意图（图 1-5.11）

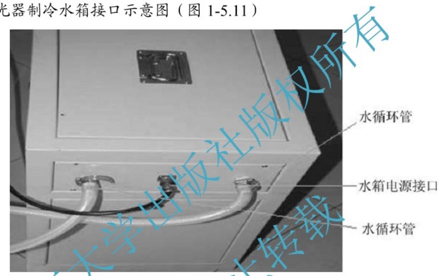


图 1-5.11　水箱接口图

(三) 实验箱接口图（图 1-5.12）

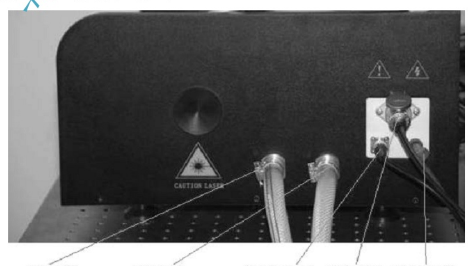


图 1-5.12　实验箱侧面接口图



(四) 整体光路图（图 1-5.13）



图 1-5.13　整体光路图

使用说明：

(1) 设备应按正常使用方向放于通风良好的场所，电源两侧及后部应留有足够的散热风道或空间。

(2) 连接的电源插座或断路器应能满足设备输入电流的要求。小功率的设备可采用活动插头连接，大功率的设备建议采取固定式连接。

(3) 连接好所有电缆，插上电源插头。

(4) 确认水泵控制线接好；输出灯线接触良好，灯线根据输出功率的情况，应使用 4～8mm^2 的多股软铜线。

(5) 将面板上的 Q 状态选择位于静态，晶压调节电位器回零位，充电调节电位器回零位频率选择置内频率(1、3、5、10 等)，确认预燃开关和工作开关置 OFF 态(弹起)。

(6) 接通电源。

(7) 开电钥匙，主继电器吸合，水泵工作，表头有显示“000”。

(8) 按下预燃开关，预燃成功，时统指示灯按所选择的频率闪动。

(9) 按下工作开关，调节充电电位器增加输出电压至所需值。

(10) 选择关门工作状态，调节“晶压调节”电位器，使激光输出为零，然后改为动态，调节延时，使输出最强(延时预调 180μs)。

(11) 关机顺序为 OFF、WORK(电压降至最低)、SIMMER，可将所需的电位器数值锁定。

(12) 第二次开机顺序为 SIMMER、WORK(调节电压至 500V 左右)、OFF-HV-ON。

注意：在紧急情况下，可直接关预燃开关，既可停机(水泵继续工作一段时间再关)。

实验 6

Nd:YAG 倍频声光调 Q 激光参数测量

一、实验目的

(1) 掌握声光调 Q 技术的工作原理。

(2) 掌握声光调 Q 和电光调 Q 激光的区别。

(3) 掌握激光倍频技术的基本原理。

(4) 测试声光调 Q 激光器的输出特性。

(5) 掌握激光器的调整方法。



二、实验内容

调整光路，测量声光调 Q 的 Nd:YAG 激光器的“脉冲峰值-重复频率”“脉冲半高宽度-重复频率”“平均功率-重复频率”“峰值功率-重复频率”的关系曲线。

三、实验原理

1. 声光调 Q 的原理

声光调 Q 技术是以声光相互作用所形成的衍射损耗的突变得以实现的，与自由运转的激光输出相比，它可以大大压缩激光脉冲宽度，从而使激光输出峰值功率提高 2～4 个数量级，是获得稳定的高重复频率(一到几十千赫兹)、高峰值功率(几到几百千瓦)、短脉冲(几十到几百纳秒)的重要激光技术。

如图 1-6.1 所示，声光调 Q 的原理是利用介质中的超声波对激光束的衍射形成的损耗调制激光器的 Q 值，把声光调制器插入到激光谐振腔中，当一定功率的高频振荡信号加在声光换能器上时，超声波在介质中传播，介质密度发生空间周期性变化，使其折射率发生相应的变化，形成等效的衍射光栅。当激光束通过超声波形成的衍射光栅时，部分光束被衍射到谐振腔外，形成损耗，谐振腔处于低 Q 状态，此时激光振荡被抑制，没有激光产生。当高频振荡信号的作用突然停止，超声场突然消失，声光器件内部的衍射也突然消失，使谐振腔处于高 Q 状态，激光器迅速形成振荡，输出一个强峰值功率脉冲。当反转粒子数被消耗减少到激光振荡的阈值粒子数以下时，振荡停止，紧接着高频等幅振荡再次形成，进入下一个循环。与电光调 Q 不同的是，声光 Q 开关关断激光振荡的时间主要由超声波通过激光束的渡越时间决定。超声波的传播速度较慢，通过激光束的渡越时间较长。因此声光 Q 开关的开启和关断时间比长得多，使调 Q 激光脉冲的脉冲宽度较长、峰值功率较低。但是，声光 Q 开关的驱动电压比电光 Q 开关低得多。因此声光 Q 开关的重复频率比电光

Q 开关高得多(可达几百 kHz)。因此声光调 Q 主要产生高重复频率、低峰值功率的激光脉冲。电光调 Q 则产生低重复频率、高峰值功率的脉冲。两种调 Q 激光分别有不同的应用领域。

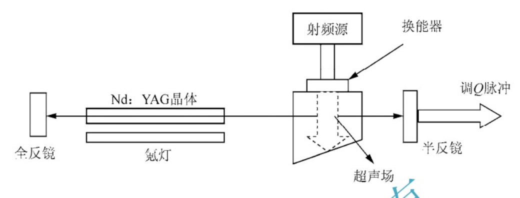


图 1-6.1　声光调 Q 激光器示意图

声光 Q 开关用于连续激光器时，需要用脉冲调制器产生频率为 f 的矩形脉冲来调制高频振荡器的信号，因此声光介质中超声场出现的频率为脉冲调制信号的频率，于是激光器输出重复率为 f 的调 Q 脉冲序列。为了能使工作物质激光上能级积累足够多的粒子，并且避免过多的自发辐射损耗，以便激光器在保证一定的峰值功率下得到最大的反转粒子数利用率，相邻两个脉冲的时间间隔 $1/f$ 大致要与激光工作物质的上能级寿命相等，例如 Nd:YAG 激光器，其上能级寿命约为 230ns，因此，选取调 Q 重复率在 4～5kHz 的调 Q 脉冲序列。重复率过高或过低都会影响调 Q 效果。

连续激光器用声光调 Q 运转方式，如图 1-6.2 所示。在这种情况下，泵浦速率 W_p 保持不变，(图 1-6.2(a))，但谐振腔的 Q 值作周期性的变化(图 1-6.2(b))，它的变化周期由脉冲调制信号频率 f 决定。输出一系列高重复率的调 Q 脉冲(图 1-6.2(c))，由于泵浦是连续的，谐振腔的 Q 值(也就是腔的损耗)以频率 f 由高 Q 态到低 Q 态做周期变化，故激光工作物质的反转粒子数也做相应的变化(图 1-6.2(d))。

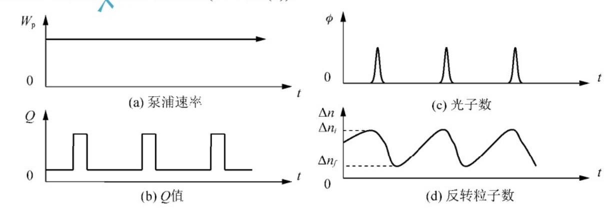


图 1-6.2　连续激光器高重复率调 Q 过程

2. 激光倍频技术

激光倍频技术是将频率为 ω(波长为 λ)的光，通过晶体中的非线性作用，产生频率为 2ω(波长为 $\lambda/2$)的光的技术，是非线性光学中最基本，也是应用最广泛的技术。



磷酸钛氧钾(KTP)是目前常用的一种倍频晶体。倍频方式分为腔外倍频和腔内倍频，腔外倍频就是把倍频晶体放在激光谐振腔外面，腔外倍频的基频光源一般采用脉冲调 Q 激光器，为了获得较高的转换效率，有时采用多级放大，提高基频光的峰值功率以便得到大的倍频光强，腔外倍频效率通常低于腔内倍频效率。腔内倍频是将倍频晶体放在激光谐振腔内，使腔内的基频光往返通过倍频晶体，在适当的条件下，可以获得较高的转换效率。对于连续运转和准连续运转的高重复频率调 Q 激光器，通常采用腔内倍频。

四、实验仪器设备

He-Ne 激光器	全反射镜	声光调制器
Nd:YAG 晶体	选通镜	倍频晶体
部分反射镜	PIN 探测器	功率计
示波器	激光防护镜	

五、实验步骤

(1) 按图 1-6.3 所示搭建实验系统。这是用氪灯泵浦 Nd:YAG 晶体的准连续激光器。波长 1.06μm 声光调 Q 激光脉冲经 KTP 晶体倍频后输出波长 0.53μm 的脉冲输出。其中 1.06R/0.53T 镜片 M_2 表示对 1.06μm 波长高反射(接近于 100%)，对 0.53μm 波长为高透射(接近于 100%)。因此全反射镜 M_1 和 1.06 R /0.53T M_2 镜片构成波长 1.06μm 谐振腔，反射镜 M_1 和半反镜 M_3 构成波长 0.53μm 谐振腔，输出 0.53μm 激光脉冲经分束片后，通过测量透射光束功率以测量激光平均功率，测量弱反射光束的散射光以测量激光的脉冲宽度和脉冲峰值等参数。

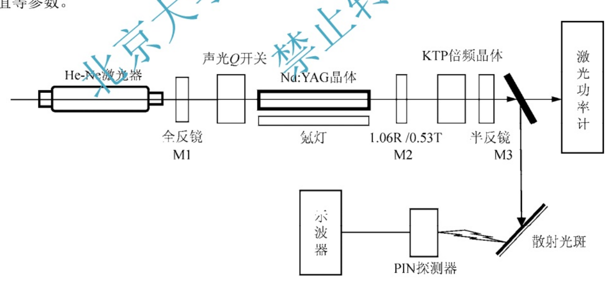


图 1-6.3　实验装置

(2) 开启冷却水电源。

(3) 启动 YAG(氪灯)驱动电源，电流数显示为 6A 左右，表示电源工作正常。

(4) 按下工作按钮 OUT 按钮，再按下 HIV 按钮，激光器进入预工作状态。

(5) 调节电流旋钮，使电流增加到 10A 左右。

(6) 打开声光 Q 开关的电源，用激光功率计测出在不同调制频率下的激光平均功率 P，填入表 1-6.1 中。

表 1-6.1　实验数据表格

重复频率 f(kHz)										
激光平均功率 P										
脉冲峰值										
脉冲半高宽度 ΔT										
激光峰值功率 P_m										

(7) 用光屏做漫反射体，用 PIN 探测器和示波器测出在不同频率下，激光脉冲的峰值、脉冲半宽 ΔT，填入表 1-6.1 中。

(8) 利用关系式 $P_m = \dfrac{P}{f \cdot \Delta T}$ 求出在不同频率下的激光峰值功率 P_m。式中，f 表示重复频率。

(9) 作出“脉冲峰值-重复频率”“脉冲半高宽度-重复频率”“平均功率-重复频率”“峰值功率-重复频率”的关系点图。

(10) 关机顺序：先关声光 Q 开关电源，再将氪灯电流调到最小，关断 OUT 按钮，再关 YAG 电源，最后关水泵电源。

六、注意事项

(1) 启动激光电源前，必须开启冷却水源。

(2) 启动电源开关，电流数显表值为 6A 左右，表示电源工作正常。

(3) 启动工作按钮 OUT 按钮，再启动 HIV 按钮，激光器进入预工作状态。

(4) 调节电流旋钮使电流增加。

(5) 当启动工作按钮 SLEEP 时，激光器电源处于睡眠状态，激光器处于预工作状态(此时氪灯电流约为 4A 左右)。

激光器停止使用时，先将工作电流调到最小，关断 OUT 按钮，在关断电源开关。

七、思考题

(1) 作图，脉冲峰值，脉冲半高宽度 ΔT，平均功率，峰值功率随重复频率的变化曲线图。

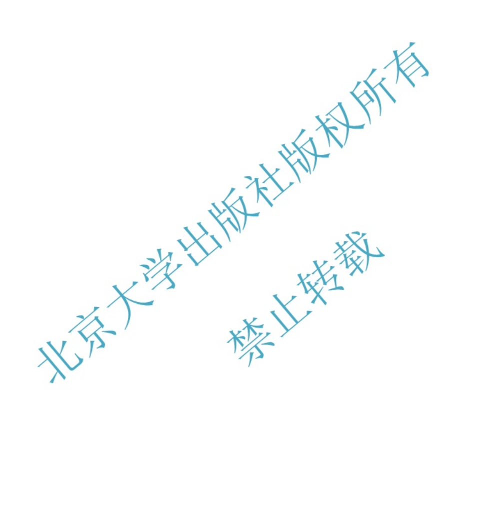


(2) 总结并解释上述各参量随调制频率变化的原因。

(3) 在声光器件中，超声场有行波与驻波之分，为什么调 Q 器件用行波场？行波场是由何种条件保证的？

(4) 声光调 Q 与电光调 Q 有什么不同？

(5) 声光调 Q 有什么应用？



实验 7

半导体激光二极管泵浦固体激光器实验

一、实验目的



(1) 掌握半导体激光二极管泵浦固体激光器的工作原理和调试方法。

(2) 掌握固体激光器被动调 Q 的工作原理。



(3) 进行调 Q 脉冲的测量。

(4) 了解固体激光器倍频的基本原理。

二、实验内容



(1) 搭建实验系统，调整光路。

(2) 测量 808nm 半导体激光器的 P-I 特性曲线。

(3) 测量 Nd:YAG 激光输出功率与泵浦功率的关系。

(4) 被动调 Q 实验，测量被动调 Q 激光波形参数与泵浦功率的关系。

(5) 腔内倍频实验。

三、实验原理

激光二极管泵浦的固体激光器(Laser Diode Pumped Solid State Laser，DPL)是指用激光二极管(Laser Diode，LD)代替闪光灯泵浦固体激光增益介质的激光器，也称为全固态激光器(All Solid State Laser)。

惰性气体灯(如氙灯、氪灯)泵浦固体激光器，具有输出功率高，光束质量好、固体介质寿命长且坚固等优点。但气体放电光源的电光转换效率不高(小于 15%)；辐射光谱太宽(紫外到红外)，固体激光介质的吸收谱带宽有限，因而激光效率低(小于 5%)；无用的紫外辐射使激光晶体寿命降低；多余的红外辐射加热激光晶体，致使激光束质量变差，并且为去除多余的热量还需要庞大的水冷系统。另外，气体放电光源寿命短、易碎、更难于模块化生产。半导体激光器的谱宽很窄(纳米量级)，波长可调，量子效率接近 1，其大功率器件的激光效率超过 50%，寿命长达万小时，且体积小、十分牢固。虽然半导体激光器的光束质量很差，发散角也很大(几十度)，且不对称，但是它的输出波长可以调整到固体激光晶体的吸收带。全固态激光器集两种激光器的优势于一体，具有转换效率高，结构紧凑、体积小、寿命长、可靠性高、结构牢固、光束质量好、输出能量大、峰值功率高、工作介质覆盖的波段广及运转方式多样等优点，是当代激光技术发展的主要方向。



DPL 激光器在民用方面，如激光加工、激光通信及激光医疗等方面有极大的市场潜力；而在军事领域，采用 808nm 大功率半导体激光器作为泵浦源的小型化 Nd:YAG，已在激光测距、测速、激光制导、激光引爆和激光雷达等方面广泛应用。

(一) 半导体激光二极管泵浦固体激光器的泵浦方式

半导体激光二极管泵浦固体激光器的结构，如图 1-7.1 所示。从半导体激光二极管泵浦固体激光器的方式来看，有端面泵浦方式和侧面泵浦方式两种。

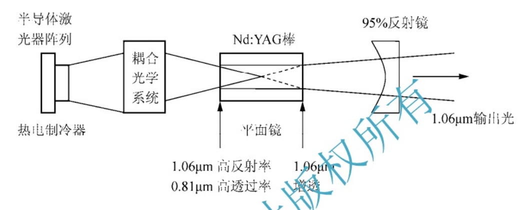


图 1-7.1　半导体激光二极管端面泵浦固体激光器结构示意图

1. 端面泵浦

端面泵浦是中小功率 LD 泵浦固体激光器常用的一种泵浦方式，具有结构紧凑、整体效率高、空间模式好的特点。它主要由 LD 泵浦源、耦合光学系统和固体激光器 3 部分组成。耦合光学系统可以是光学透镜耦合和光纤耦合。二极管阵列输出的空间相干光束沿着光学谐振腔的轴向泵浦，光束聚焦在激活介质的一个小体积内。谐振腔的参数保证泵浦光束和谐振腔模的激发空间能很好的重叠在一起，达到模式匹配。重叠程度直接影响光泵浦的效率和输出光束的质量。同时，端面泵浦在入射方向的穿透深度很大，增益介质对泵浦光充分吸收，泵浦阈值功率低，斜效率高，因此，端面泵浦系统在大功率、高光束质量、结构紧凑、转换效率高的全固态激光器中得到广泛应用。

2. 侧面泵浦

端面泵浦虽然能够获得高效率、高光束质量的激光输出，但是由于受到泵浦区域尺寸以及热效应等的限制，泵浦功率不能做得很大。随着激光二极管输出功率的提高和热管理技术的进步，根据灯泵激光器的设计思路，采用多个 LD 阵列，设计合理的激光介质的结构，通过长方体表面或者圆柱体表面将泵浦光能量泵入晶体，这为泵浦耦合和散热都提供了较大的表面面积，因而输出功率可以大大提高。同时靠增加激活介质的尺度也很容易提高输出功率。目前，百瓦级甚至万瓦级全固态激光器大都采用阵列泵浦结构。其中，激光介质可以做成棒状、板条状和盘状。图 1-7.2 为一种侧面泵浦的示意图，3 条二极管阵列按照 120° 间隔均匀对称排列，通过柱状透镜侧面泵浦激光棒。

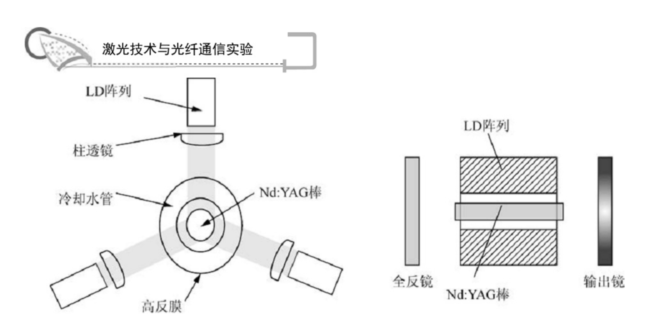


图 1-7.2　3 条激光二极管阵列侧面泵浦 Nd:YAG 结构图

(二) 半导体激光泵浦固体激光器的倍频技术

光波电磁场与非磁性透明电介质相互作用时，光波电场会出现极化现象。当强激光产生时，由此产生的介质极化已经不再是与场强呈线性关系，而是明显的表现出二次及此更高次的非线性效应。倍频现象就是二次非线性效应的一种特例。常用的倍频晶体有 KTP、KDP、LBO、BBO 和 LN 等。KTP 晶体在 1064nm 波长的光附近有高的非线性系数。它导热性良好，非常适合用于 YAG 激光的倍频。倍频技术通常有腔内倍频和腔外倍频两种。腔内倍频是将倍频晶体放置在激光谐振腔之内，由于腔内具有较高的功率密度，因此较适合于连续运转的固体激光器，如图 1-7.3 所示。腔外倍频是将倍频晶体放置在激光谐振腔之外的倍频技术，较适合于脉冲运转的固体激光器。

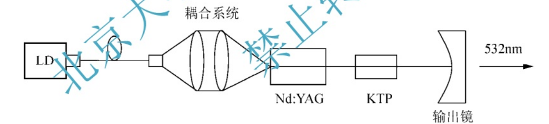


图 1-7.3　腔内倍频连续激光器

(三) 半导体激光泵浦固体激光器的调 *Q* 技术

目前常用的调 *Q* 方法有电光调 *Q*(见图 1-7.5)、声光调 *Q*(见图 1-7.6)和被动式可饱和吸收调 *Q*(见图 1-7.4)。

1. 被动调 *Q*

如图 1-7.4 所示，可饱和吸收调 *Q* 结构简单，使用方便，无电磁干扰，可获得峰值功率大、脉冲小的巨脉冲。Cr^{4+} : YAG 被动调 *Q* 的工作原理是：当 Cr^{4+} : YAG 被放置在激光谐振腔内时，它的透过率会随着腔内的光强而改变。在激光振荡的初始阶段，Cr^{4+} : YAG 的透过率较低，随着泵浦作用增益介质的反转粒子数不断增加，当谐振腔增益等于谐振腔损耗时，反转粒子数达到最大值，此时可饱和吸收体的透过率仍为初始值。随着泵浦的进一步作用，腔内的光子数不断增加，可饱和吸收体的透过率也逐渐变大，并最终达到饱和。



此时，Cr^{4+}:YAG 的透过率突然增大，光子数密度迅速增加，激光振荡形成。腔内光子数密度达到最大值时，激光输出最大。此后，由于反转粒子束减少，光子数密度开始减低，则可饱和吸收体 Cr^{4+}:YAG 的透过率也开始减低。等光子数密度降到初始值时，Cr^{4+}:YAG 的透过率也恢复到初始值，调 Q 脉冲结束。

图 1-7.4　被动调 Q 脉冲式激光器

2. 电光调 Q(见图 1-7.5)

图 1-7.5　电光调 Q 腔外倍频的脉冲式激光器

3. 声光调 Q(见图 1-7.6)

(a) 端面泵浦

(b) 侧面泵浦

图 1-7.6　声光调 Q 腔内倍频的脉冲式激光器

四、实验仪器设备

808nm 半导体激光器及其驱动电源	光学耦合系统(两个凸透镜)	Nd:YAG 晶体
650nm 半导体激光器及其驱动电源	宽波段激光功率计	Cr^{3+} : YAG 晶体
KTP 晶体	反射镜(输出镜)	光电二极管
光学导轨	数字示波器	小孔屏

五、实验步骤

1. 808nm 半导体激光器的特性测量

(1) 将 808nm 激光器放置在实验导轨的一端，在导轨的另一端放置 650nm 半导体激光器及小孔屏(准直器)。开启 650nm 激光器的驱动电源，调节 650nm 激光器与导轨的平行，并使激光器穿过小孔屏上的小孔。(调节方法：将小孔屏靠近 650nm 激光器，调节小孔屏上下和左右，使激光穿过小孔；将小孔移至远处，调激光器俯仰和扭摆，使激光器再次穿过小孔。将小孔屏再次靠近 650nm 激光器，重复以上步骤，直到小孔屏在近处和远处激光都能穿过小孔。准直器调好以后，在下面的实验操作中，基准光保持不动，小孔屏靠近 650nm 激光器放置)

(2) 将耦合系统(两个凸透镜)和宽波段功率计探头安装在光学导轨上，将宽波段功率计探头与功率计连接，开启功率计电源，将功率计调零。

(3) 将 808nm 激光器与控制电源连接上，将控制电源上“电流”旋钮逆时针旋至最小。开启电源，将 808nm 激光器的工作状态选择为“连续”，调节“电流”旋钮，使电流缓慢增大，用白屏可观察到输出激光。(注意：严禁直视激光以及身体部位被激光直接照射)

(4) 仔细调节两个凸透镜与 808nm 激光器的距离以及这两个凸透镜直接的距离，使激光光斑大小略小于探测器的受光面积(光斑不能太小，防止激光进入光探测器时，探测器受光面积处的光过强而损坏光探测器)。调节功率计至适当量程，此时可读出 808nm 激光器的输出功率。

(5) 将 808nm 激光器的电流调到最小，然后缓慢增大，记录不同电流下对应的输出功率，见表 1-7.1。作出电流-输出功率曲线，并确定阈值电流。

2. 半导体激光器泵浦 Nd:YAG 激光器的组装调试和测量

(1) 如图 1-7.7 所示，将 808nm 半导体激光器、耦合系统、Nd:YAG 激光晶体、输出镜、准直器等元器件安装在光学导轨上。

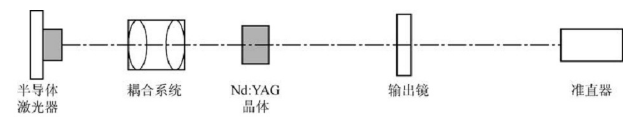


图 1-7.7　半导体激光器泵浦 Nd:YAG 激光器系统图

(2) 准直器的调节，同上。

(3) 将 Nd:YAG 晶体放在耦合系统后，调节其与耦合系统的距离，使 808 激光聚焦到



Nd:YAG 晶体表面。调节 Nd:YAG 晶体的上下和左右，使焦点处于晶体中心。

(4) 调节 Nd:YAG 晶体的俯仰和扭摆，使其反射的 650nm 激光穿过小孔屏上的小孔。再在 Nd:YAG 晶体后面约 20cm 处放置输出镜(反射镜)，调整其俯仰和扭摆，使其反射的 650nm 激光同样穿过小孔。

(5) 细微调整输出镜和 YAG 晶体的俯仰和扭摆，使谐振腔输出 1064nm 的红外激光，用红外显示卡片在小孔屏前观察 1064nm 激光。

(6) 将宽波段功率计探头放置在输出镜后，可测量输出的 1064nm 激光的功率。

(7) 模式匹配观察。改变耦合系统中透镜的位置，使 808nm 激光聚焦位置发生改变，观察输出 1064nm 激光功率的变化，找到功率最大时的透镜位置。

(8) Nd:YAG 激光器效率曲线。改变 808nm 激光工作电流，记录不同电流下 1064nm 激光输出功率，见表 1-7.2，作出输入-输出功率曲线，并确定阈值功率。

3. 半导体激光器泵浦 Nd:YAG 激光器的倍频和被动调 Q 实验

1) 半导体泵浦固体激光器倍频实验

(1) 如图 1-7.8 所示，将 KTP 晶体放入 Nd:YAG 激光器的谐振腔中，可以在小孔屏上观察到 532nm 激光。调整输出镜的俯仰扭摆，观察 532nm 激光横模模式变化，将光斑调制最亮。

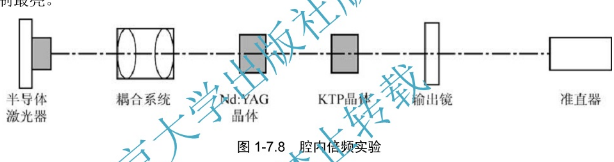


图 1-7.8　腔内倍频实验

(2) 角度匹配。旋转 KTP 晶体，可以观察到 532nm 激光强度的变化，调至最佳角度使输出激光功率最大。

(3) 532nm 激光输出功率与泵浦功率密度关系。将 KTP 晶体放置在谐振腔不同位置，观察输出 532nm 激光功率的变化。

实验结果：____

____。

2) 半导体泵浦固体激光器调 Q 实验(被动调 Q)

(1) 如图 1-7.9 所示，将 Cr^{3+} : YAG 晶体放置在谐振腔内，在输出镜后放置光电二极管，将二极管输出接入示波器。

(2) 调节调 Q 晶体的俯仰扭摆角度，在示波器上观察调 Q 激光脉冲波形。

(3) YAG 荧光寿命。减小 808nm 激光器的工作电流，观察脉冲频率的变化。当频率减小至最小值后，脉冲波形消失，最小频率对应的周期即为 YAG 荧光寿命。不同驱动电流时，调 Q 激光脉冲波形参数填入表 1-7.3 中。

(4) 532nm 激光调 Q。将 KTP 晶体放置在谐振腔中，选择 KTP 晶体的匹配角度，观察输出 532nm 激光输出功率与未加调 Q 晶体时输出功率的区别。

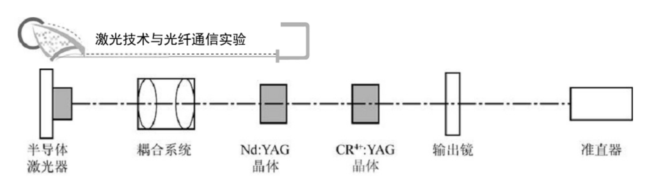


图 1-7.9　被动调 Q 实验

六、实验数据与分析

(1) 表 1-7.1。

表 1-7.1　808 半导体激光器的电流-输出功率关系表(温度：25°C)

电流/A	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
功率/mW											
电流/A	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	
功率/mW											

(2) 表 1-7.2。

表 1-7.2　1064nm 激光输出功率(温度：25°C)

电流/A	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
1064nm 功率/mW											
电流/A	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	
1064nm 功率/mW											

(3) 将 KTP 晶体放置在谐振腔不同位置，观察输出 532nm 激光功率的变化。

实验结果：____

____。

(4) 表 1-7.3。

表 1-7.3　808nm 激光工作电流与调 Q 激光脉冲波形的关系(温度：25°C)

电流/A	1.5	1.55	1.7	1.9	2.1	2.3
脉冲周期/μs						
半高脉宽/μs						
脉冲高度/mV						

(5) 观察输出 532nm 激光输出功率与未加调 Q 晶体时输出功率的区别。

结论：____

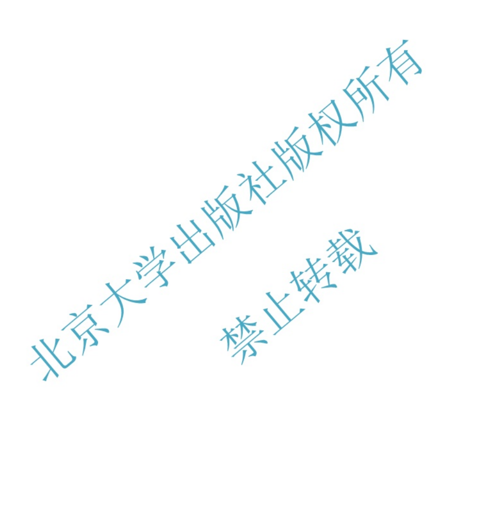
____。



七、思考题

(1) 画出 808nm 半导体激光器的 I-P 特性曲线，确定阈值电流。

(2) 画出 Nd:YAG 激光 1064nm 输出功率与泵浦功率的关系曲线。



实验 8

单光子计数实验

一、实验目的

(1) 了解单光子计数系统的原理。
(2) 掌握测量极弱光信号的方法。
(3) 了解极弱光的概率分布规律。
(4) 用光子计数器测量光量子起伏。
(5) 学习和运用该系统的电脑控制软件。

二、实验内容

熟悉单光子测量软件的使用，用单光子计数测量系统统计发光二极管在微弱光情况下单位时间内的光子个数，并用 MATLAB 软件画出其分布曲线，与理论分布进行比较。

三、实验原理

光子计数也就是光电子计数，是微弱光信号探测中的一种新技术。它可以探测极弱的光能，弱到光能量以单光子达到时的能量。目前已被广泛应用于喇曼散射探测、医学、生物学、物理学等许多领域里微弱发光现象的研究。光子计数输出信号的形式是数字量，容易与计算机连接进行信息处理。

量子光学原理表明，光源发出的光子数是随机起伏的。例如热辐射光源(如白炽灯)的光子数分布为超泊松分布，相干态的光子数为泊松分布。为了明显的观察或测量光子数的随机起伏，光源必须很弱。本实验用光子计数器测量发光二极管光源在低功率状态下的量子起伏。

(一) 光子

光是由光子组成的光子流，光子是静止质量为零、有一定能量的粒子。与一定的频率 ν 相对应，一个光子的能量 E_p 可由式(1-8.1)决定：

$$E_p=\frac{hc}{\lambda}=h\nu \tag{1-8.1}$$

式中：$c=3\times10^8\,\text{m/s}$，是真空中的光速；$h=6.6\times10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s}$，是普朗克常数。例如，实验中所用的光源波长为 $\lambda=5000\text{Å}$ 的近单色光，则 $E_p=3.96\times10^{-19}\,\text{J}$。光流强度常用光功率 P 表示，单位为 W。单色光的光功率与光子流量 R(单位时间内通过某一截面的光子数目)的关系为



$$P=R\cdot E_{\rm p} \tag{1-8.2}$$

所以，只要能测得光子的流量 R，就能得到光流强度。如果每秒接收到 R=104 个光子数，对应的光功率为 $P=R\cdot E_{\rm p}=10^{4}\times 3.96\times 10^{-19}=3.96\times 10^{-15}\,\rm W$。

(二) 测量弱光时光电倍增管输出信号的特征

在可见光的探测中，通常利用光子的量子特性，选用光电倍增管作探测器件。光电倍增管从紫外到近红外都有很高的灵敏度和增益。当用于非弱光测量时，通常是测量阳极对地的阳极电流(图 1-8.1(a))，或测量阳极电阻 $R_{\rm L}$ 上的电压(图 1-8.1(b))，测得的信号电压(或电流)为连续信号。然而在弱光条件下，阳极回路上形成的是一个个离散的尖脉冲。为此，必须研究在弱光条件下光电倍增管的输出信号特征。

弱光信号照射到光阴极上时，每个入射的光子以一定的概率(即量子效率)使光阴极发射一个光电子。这个光电子经倍增系统的倍增，在阳极回路中形成一个电流脉冲，即在负载电阻 $R_{\rm L}$ 上建立一个电压脉冲，这个脉冲称为“单光电子脉冲”，如图 1-8.2 所示。脉冲的宽度 $t_{\rm w}$ 取决于光电倍增管的时间特性和阳极回路的时间常数 $R_{\rm L}C_0$，其中 C_0 为阳极回路的分布电容和放大器的输入电容之和。性能良好的光电倍增管有较小的渡越时间分散，即从光阴极发射的电子经倍增极倍增后的电子到达阳极的时间差较小。若设法使时间常数较小则单光电子脉冲宽度 $t_{\rm w}$ 减小到 10ms～30ms。如果入射光很弱，入射的光子流是一个一个离散地入射到光阴极上，则在阳极回路上得到一系列分立的脉冲信号。

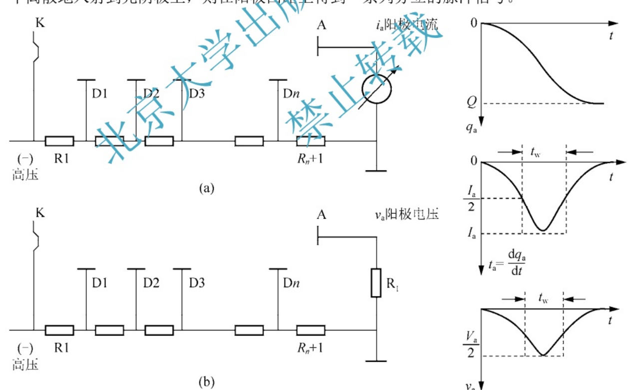


图 1-8.1　光电倍增管负高压供电及阳极电路图

图 1-8.2　光电倍增管阳极波形

图 1-8.3 是当入射光功率不同时，用示波器观察到的光电倍增管弱光输出信号经过放大器后的波形的示意图。例如，图 1-8.3(a)是当入射光功率 $P_i \approx 10^{-11}$W 时，光电子信号是一直流电平并叠加有闪烁噪声；图 1-8.3(b)是当 $P_i \approx 10^{-12}$W 时，直流电平减小，脉冲重叠减小，但仍存在基线起伏；图 1-8.3(c)是当光强继续下降到 $P_i \approx 10^{-13}$W 时，基线开始稳定，重叠脉冲极少；图 1-8.3(d)当 $P_i \approx 10^{-14}$W 时，脉冲无重叠，基线趋于零。由图可知，当光强下降为10^{-14} W 量级时，在 1ms 的时间内只有极少几个脉冲，也就是说，虽然光信号是持续照射的，但光电倍增管输出的光电信号却是分立的尖脉冲。这些脉冲的平均计数率与光子的流量成正比。

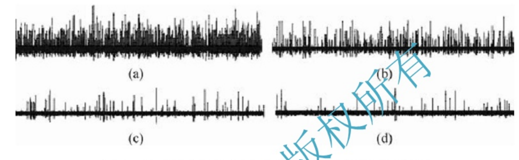


图 1-8.3　不同光强下光电倍增管输出信号波形示意图

图 1-8.4 为光电倍增管阳极回路输出脉冲计数率 ΔR 随脉冲幅度大小的分布。曲线表示脉冲幅度在 $V:(V+\Delta V)$ 的脉冲计数率 ΔR 与脉冲幅度 V 的关系，它与曲线 $(\Delta R/\Delta V):V$ 有相同的形式。因此在 ΔV 取值很小时，这种幅度分布曲线称为脉冲幅度分布的微分曲线。形成这种分布的原因有以下几点。

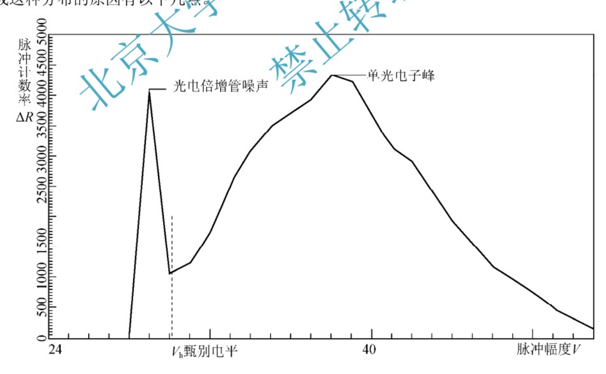


图 1-8.4　光电倍增管输出脉冲幅度分布的微分曲线

(1) 除光电子脉冲外，还有各倍增极的热发射电子在阳极回路形成的热发射噪声脉冲。

热电子受倍增的次数比光电子少，因此它们在阳极上形成的脉冲大部分幅度较低。

(2) 光阴极的热发射电子形成的阳极输出脉冲。

(3) 各倍增极的倍增系数有一定的统计分布(大体上遵从泊松分布)。

因此，噪声脉冲及光电子脉冲的幅度也有一个分布，在图 1-8.4 中，脉冲幅度较小的主要是热发射噪声信号，而光阴极发射的电子(包括热发射电子和光电子)形成的脉冲，它的幅度大部分集中在横坐标的中部，出现“单光电子峰”。如果用脉冲幅度甄别器把幅度高于 V_h 的脉冲鉴别输出，就能实现单光子计数。

(三) 光子计数器的组成

光子计数器的原理方框图如图 1-8.5 所示。

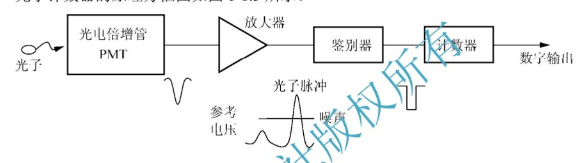


图 1-8.5　光子计数系统的原理框图

入射到光电倍增管阴极上的光子引起输出信号脉冲，经放大器输送到一个脉冲高度鉴别器上。由放大器输出的信号除有用光子脉冲外，还包括器件噪声和多光子脉冲。后者是由时间上不能分辨的连续光子集合而成的大幅度脉冲。峰值鉴别器的作用是从中分离出单光子脉冲，再用计数器计数光子脉冲数，计算出在一定时间间隔内的计数值。

四、实验仪器设备

实验系统由单光子计数器、制冷系统、外光路、电脑控制软件等组成。实验主机实物如图 1-8.6 所示。

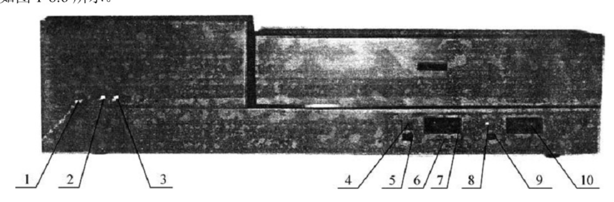


图 1-8.6　单光子计数器主机

1—USB 接口；2—监测 2；3—监测 1；4—调零钮；5—功率计电源开关；

6—量程变换；7—功率指示；8—电流调节；9—光源开关；10—电流指示

实验系统的光路如图 1-8.7 所示。

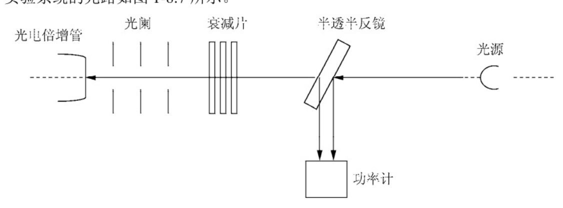


图 1-8.7　实验系统的光路图

1. 光源

用高亮度发光二极管作光源，波长中心 500nm，半宽度 30nm。为提高入射关光的单色性，仪器备有窄带滤光片，其半宽度为 18nm。

2. 接收器

接收器采用光电倍增管。实验采用半导体制冷器降低光电倍增管的工作温度，最低温度可达−20℃。

为减小杂散光的影响和降低背景计数，在光电倍增管前设置了一个 3 片光阑。为了得到极微弱的光强，光路中放置了光衰减片。

五、实验步骤

(1) 将实验系统的 USB 接口接到计算机的 USB 接口，接上制冷控制系统。

(2) 打开实验系统的主机电源、制冷系统电源、功率计电源开关和光源开关。

(3) 关闭窗帘、门和照明灯，尽量减少背景杂散光。

(4) 调节温度控制表的控制温度，待 20min 后温度达到所需的温度后，可开始测量。

(5) 启动软件，显示工作界面。软件安装后，从“开始”菜单执行“程序”组中的“单光子计数系统”命令，即可启动该软件。工作界面如图 1-8.8 所示。

(6) 工作界面主要由菜单栏、主工具栏、辅工具栏、工作区、状态栏、参数设置区、寄存器选择及光子数显示区以及寄存器信息提示区等组成。

(7) 测量光子数几率分布曲线。将光源电流调到最小，测量 300 次。

① 在软件界面的“当前寄存器下拉选择栏”中选择当前工作寄存器，如寄存器-1。此时，采样到的数据就存储在寄存器 1 中，寄存器 1 中的旧数据被新数据覆盖。当然也可以选择其他工作寄存器。

② 在“参数设置”选项中，设置采样模式为：时间方式。

③ 设置采样参数：时间单位：毫秒；采样间隔：2；积分时间：2。

④ 单击工具栏中的“开始”按钮，开始测量。则采样到的光子数及采样时间显示在软件界面的“光子数显示区”，等待一段时间后，采样次数达到 300 次，即可单击工具栏中的“停止”按钮，停止测量。



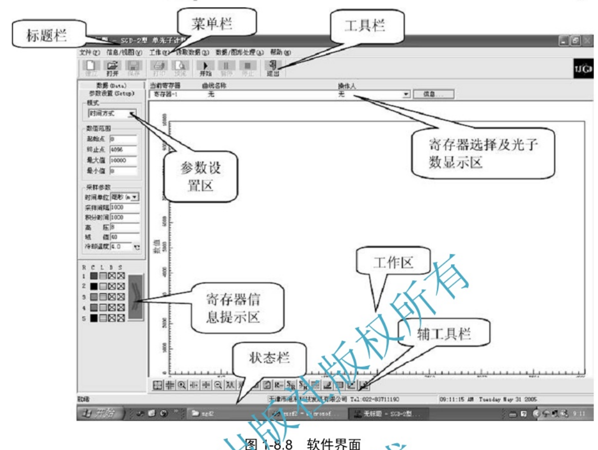


图 1-8.8　软件界面

⑤ 单击“数据”选项，打开刚才测量时选择的寄存器 1，可见测量的数据显示在其中。单击菜单“文件”→“保存”命令将数据以扩展名为.dgz 的形式保存起来(系统同时保存同文件名，扩展名为.txt 的文本文件)，以便后面的数据处理。

⑥ 单击辅助工具栏中的“显示”按钮或者单击菜单“读取数据”→“显示”命令，即可显示光子谱线(量子起伏)。

⑦ 将⑤的数据记录在表 1-8.1 中。

⑧ 计算光子数平均值和方差。

⑨ 计算同样光子数出现的次数，并除以测量的总次数，得到该光子数的概率，填入表 1-8.2 中。

⑩ 以光子数为横坐标，概率为纵坐标，绘出光子数概率分布曲线，并与理论的泊松分布曲线比较(Matlab 绘图)。

六、注意事项

(1) 具备暗室条件。

(2) 环境温度：20±5℃。

(3) 相对湿度：<65%。

(4) 无强振动源、无强电磁场干扰。

(5) 室内保持清洁、无腐蚀性气体。

(6) 仪器应放置在坚固的平台上。

(7) 仪器放置处不可长时间受阳光照射。

(8) 室内应具稳压电源装置对仪器供电，装有地线，保证仪器接地良好。

七、实验数据与分析

表 1-8.1　300 个实验统计的光子个数

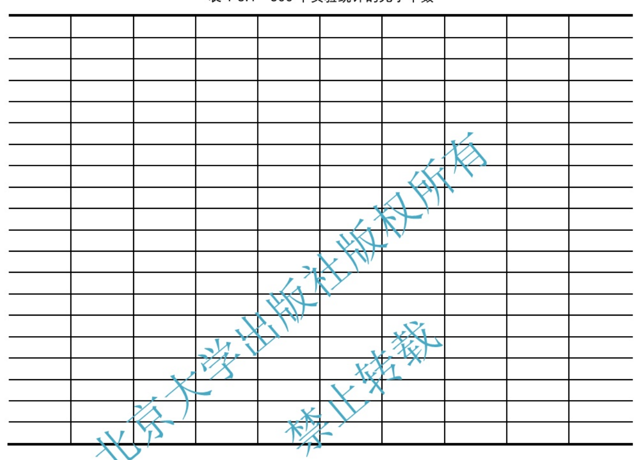


表 1-8.2　每个光子数出现的概率

光子数	出现的次数	出现的概率(%)

光子数的平均值为______，方差为________。

八、思考题

(1) 简述光电倍增管的工作原理。



(2) 光电倍增管的暗电流对采集结果有无影响，为什么？如何减小暗电流？

(3) 简述光子计数器的工作原理。

(4) 有哪些因素会影响测量结果？

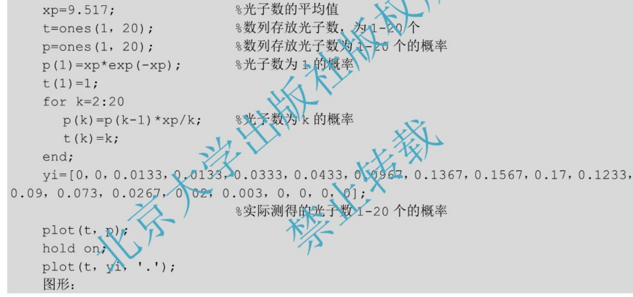
(5) 如果发光二极管的驱动电流调得很大，对实验结果有影响吗？为什么？

九、MATLAB 编程

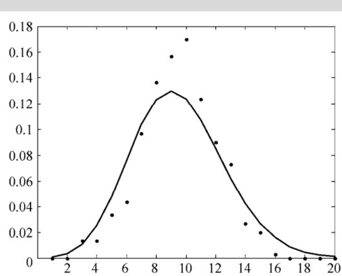
泊松分布：光子数为 k 时的概率为：$p(X=k)=\dfrac{\lambda^k \mathrm{e}^{-\lambda}}{k!}$　$(k=0,1,2,3,\cdots)$，其中 λ 为光子数的平均值。

将测得的数据文件 txt 打开，将数据复制到 Excel 表中，运用 Excel 中的函数 AVERAGE 和 VAR 命令可以求出测得的光子数的平均值和方差。运用 Excel 的排序功能，可以找出每个光子数出现的次数，从而求得每个光子数出现的概率。

用 MATLAB 画图程序的例子：



```
    xp=9.517;                   %光子数的平均值
    t=ones(1, 20);              %数列存放光子数，为 1-20 个
    p=ones(1, 20);              %数列存放光子数为 1-20 个的概率
    p(1)=xp*exp(-xp);           %光子数为 1 的概率
    t(1)=1;
    for k=2:20
       p(k)=p(k-1)*xp/k;        %光子数为 k 的概率
       t(k)=k;
    end;
    yi=[0, 0, 0.0133, 0.0133, 0.0333, 0.0433, 0.0967, 0.1367, 0.1567, 0.17, 0.1233,
0.09, 0.073, 0.0267, 0.02, 0.003, 0, 0, 0, 0];
                                %实际测得的光子数 1-20 个的概率
    plot(t, p);
    hold on;
    plot(t, yi, '.');
    图形：
```



实验 9
四象限探测器及光电定向实验

一、实验目的

(1) 了解单脉冲定向原理。

(2) 了解四象限光电二极管的性能。

(3) 学习设计、装调光电探测系统。



二、实验内容

搭建实验系统，光源发出的光用四象限器接收，装调窄脉冲光信号的放大电路、展宽电路以及和差电路。最后得出输出信号与方向偏差的关系曲线。

三、实验原理

光电定向是指光电系统测定目标的方向，光电定向作为光电技术原理实验系统的重要组成部分，在实际应用中具有精度高、价格低、便于自动控制和操作方便的特点，因此可用于光电准直、光电自动跟踪、光电制导和光电测距等，也可用于线切割机床等民用品中。光电定向方式有扫描式、调制盘式和四象限式，前两种用于连续信号工作方式，后一种用于脉冲信号工作方式。本实验是用四象限式的方法来完成光电定向的实验。

(一) 单脉冲定向原理

四象限光电探测器测量原理如图 1-9.1 所示。

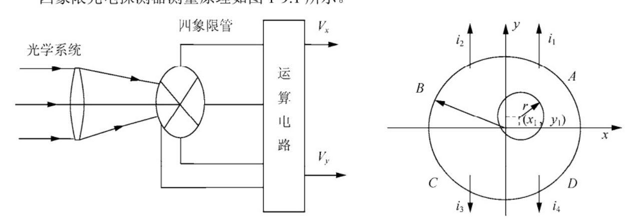


图 1-9.1 四象限光电探测器原理

光学系统与四象限管组成测量目标方位的直角坐标系。四象限管是由 4 个光电二极管



A、B、C、D 制作在一起的光电探测器，故称四象限管。四象限管的分界限与直角坐标系坐标轴 x、y 重合，其十字形交点与光学系统的光轴重合。光学系统接收光脉冲后把目标成像于四象限管上。从远方射来的光信号可近似为平行光波，所以在光学系统的焦平面上成像为爱里斑。在定向系统中，四象限管通常不放在光学系统的焦平面上而是放在焦平面附近(焦平面之前或之后)。于是，四象限管得到的目标像近似为圆形光斑。当光轴对准目标时，圆斑中心在光轴上，4 个光电二极管接收到相同的光功率，输出相同的光信号。表示目标方位偏离值 $x=0$，$y=0$。当光轴未对准目标时，光斑中心偏离光轴，4 个光电二极管将输出不同的信号。通过信号处理电路可得到光斑中心偏差量 x_1 和 y_1。目标方位偏离光轴越远，输出方位误差信号也越大。若图中光斑半径为 r，中心坐标为 x_1、y_1，为分析方便起见，认为光斑得到均匀辐射功率，总共率为 P。在各个象限探测器上得到的扇形光斑面积是光斑总面积的一部分。若设各象限上的光斑面积占总光斑面积的百分比为 A、B、C、D。则由求扇形面积公式可推得下述关系：

$$(A-B)+(C-D)=\frac{2x_1}{\pi r}\sqrt{1-\frac{x_1^{\,2}}{r^2}}+\frac{2}{\pi}\sin^{-1}\left(\frac{x_1}{r}\right) \tag{1-9.1}$$

当 $\frac{x_1}{r}<<1$ 时

$$A-B-C+D\approx\frac{4x_1}{\pi r}$$

即

$$x_1=\frac{\pi r}{4}\left(A-B-C+D\right) \tag{1-9.2a}$$

同理可得

$$y_1=\frac{\pi r}{4}\left(A+B-C-D\right) \tag{1-9.2b}$$

可见，只要能测出 A、B、C、D 和 r 就可以求得目标的直角坐标 (x_1,y_1)。

利用单脉冲光信号确定目标方向的原理有 4 种：和差式、对差式、和差比幅式和对数相减式。

1. 和差式

和差式定向原理如图 1-9.2 所示。

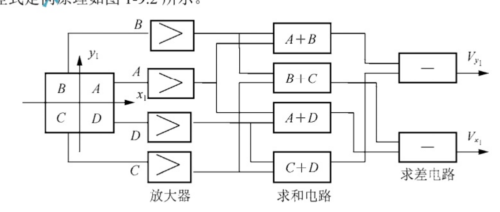


图 1-9.2　和差定向原理方框图

但是在实际系统中，不能直接测得 r，可以测的量是各个象限的功率信号。若光电二极管的材料是均匀的，则各个象限的光功率与各个象限的光斑面积成正比。四象限管的各象限的输出信号也与各象限上的光斑面积成正比。利用图 1-9.2 所示的信号处理电路可以

实现和差定向的原理。系统输出电压信号为

$$V_{x_1} = kP\left[\left(A+D\right)-\left(B+C\right)\right] \tag{1-9.3a}$$

$$V_{y_1} = kP\left[\left(A+B\right)-\left(C+D\right)\right] \tag{1-9.3b}$$

对应的坐标偏移量为

$$x_1 = k\left[\left(A+D\right)-\left(B+C\right)\right] \tag{1-9.4a}$$

$$y_1 = k\left[\left(A+B\right)-\left(C+D\right)\right] \tag{1-9.4b}$$

式中：k 为常数，与系统参数有关。

2. 对差式

将图 1-9.2 的坐标系旋转 45°，得到新的坐标偏移量为

$$x_2 = x_1\cos 45° + y_1\sin 45° = \sqrt{2}k\left(A-C\right) \tag{1-9.5a}$$

$$y_2 = -x_1\sin 45° + y_1\cos 45° = \sqrt{2}k\left(B-D\right) \tag{1-9.5b}$$

对差式定向原理方框图如图 1-9.3 所示。

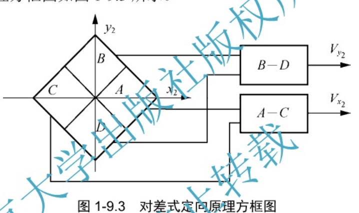


图 1-9.3 对差式定向原理方框图

3. 和差比幅式

上述两种情况中，输出的坐标信号均与系数 k 有关。而 k 又与接收到的目标辐射功率有关。它是随目标距离远近而变化的。这时系统输出电压 V_x、V_y 并不能代表目标真正的坐标。采用和差比幅式可以解决这一问题。即

$$x_3 = \frac{k\left[A+D-(B+C)\right]}{k\left(A+B+C+D\right)} = \frac{A+D-(B+C)}{\left(A+B+C+D\right)} \tag{1-9.6a}$$

$$y_3 = \frac{k\left[A+B-(C+D)\right]}{k\left(A+B+C+D\right)} = \frac{A+B-(C+D)}{\left(A+B+C+D\right)} \tag{1-9.6b}$$

式(1-9.6)中不存在系数 k，与系统接收到目标辐射功率的大小无关，所以，定向精度很高。实现的系统电路框图如图 1-9.4 所示。

4. 对数相减式

在目标信号变化很大的情况下，可以采用对数相减定向方法，如图 1-9.5 所示。坐标信号为

$$x_4 = \lg k\left(A-B\right)-\lg k\left(C-D\right) = \lg\left(A-B\right)-\lg\left(C-D\right) \tag{1-9.7a}$$

$$y_4 = \lg k\left(A-D\right)-\lg k\left(C-B\right) = \lg\left(A-D\right)-\lg\left(C-B\right) \tag{1-9.7b}$$



可见，坐标信号中也不存在系数 k，同样消除了接收到的功率变化的影响。

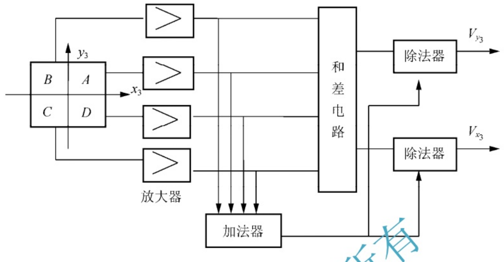


图 1-9.4　和差比幅式定向原理方块图

采用对数放大器和相减电路可实现对数相减式，其原理方块图如图 1-9.5 所示。

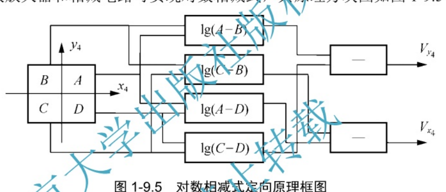


图 1-9.5　对数相减式定向原理框图

当定向误差很小时，可以得到以下近似关系：

$$x_4 = \lg(A-B) - \lg(C-D) \approx (A+D) - (B+C) \tag{1-9.8a}$$

$$y_4 = \lg(A-D) - \lg(C-B) \approx (A+B) - (C+D) \tag{1-9.8b}$$

式(1-9.8a)和式(1-9.8b)的关系就是和差式关系，因此在定向误差很小时，对数相减式实际上就是和差式。

(二) 定向信号处理电路

本实验采用的是和差比幅式定向法。根据图 1-9.4，分别介绍各功能模块电路。

1. 四象限管的偏置与放大电路

单脉冲定向系统中，光脉冲通常由激光产生，其脉冲宽度一般为几十纳秒数量级，也可以做得更窄。而重复频率比较低，一般为几十赫兹，这种信号后面要用来显示或控制的，所以需要放大并展宽。

四象限管的偏置电路如图 1-9.6 所示，图中 D_1、D_2、D_3、D_4 分别为四象限管的 4 个光电二极管。使用光电二极管接收快速光脉冲时，为了得到好的线性响应，尽量减小结电容和分布电容对响应速度的影响，同时，偏置电路的负载电阻 R_L 也不能取得太大。

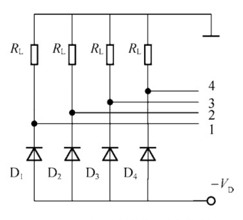


图 1-9.6 四象限管的偏置电路

四象限管偏置电路输出的信号幅值比较小，必须经过高倍率放大后才能用来进行计算、显示和控制。重复频率很低的窄脉冲可以按照单脉冲进行处理。为了使窄脉冲放大而不失真，要求放大器的通频带带宽要足够宽。假设矩形窄脉冲的的宽度为τ，则放大器的通频带带宽Δf应为

$$\Delta f = \frac{0.35 \sim 0.45}{\tau}$$

2. 展宽电路

窄脉冲展宽电路实质上是峰值保持电路的一个特例，用于将目标脉冲信号在显示或控制时有一个持续时间，以便观察。4 路信号通过放大器放大后的信号送入如图 1-9.7 所示的展宽电路进行展宽。由于脉冲宽度极窄要求电路响应快，又要保持相对较长的时间，而且还需要有较高的线性输出，采用一般的二极管和电容组成的峰值保持电路难以完成。

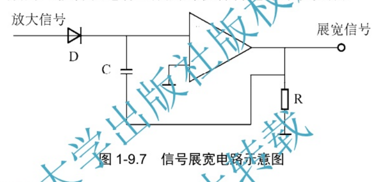


图 1-9.7 信号展宽电路示意图

3. 和差比幅运算电路

和差比幅运算电路可以有两种方案完成。方案一，用模拟电路系统实现，根据图 1-9.4 可知，它由一个电阻网络或运放实现求和电路，用差动放大器实现求差运算，并包括除法电路、再经过低通滤波器整成直流，用直流电压表指示。可见用模拟系统很复杂，具体电路略。方案二，用数字电路系统实现，如图 1-9.8 所示，展宽信号经过模/数转换电路后，送入计算机用程序进行加减、除法等相关运算并显示结果。

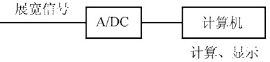


图 1-9.8 实现和差比幅运算的数字电路系统

四、实验仪器设备

光纤耦合输出小型半导体激光器	单模光纤	光纤输出准直镜
四象限探测器(含探头，电源，控制器)	V 型夹持器	可变光阑
精密平移台	侧升降台	一维光栅
干板架	反射镜	导轨
滑块	计算机	测量软件



五、实验步骤

本实验四象限探测器采用和差比幅式定向算法对光斑进行定位，由于光电二极管将接收到的光功率转化为对应的光电流，假设探测器 4 个象限的光电特性参数完全相同，光斑能量分布为均匀分布。则 4 个象限的光电探测器接收到的光功率 A、B、C、D 对应的输出电流为 i_1、i_2、i_3、i_4，则光斑对应的坐标偏移量为

$$\Delta x = \frac{(i_1 + i_4) - (i_2 + i_3)}{i_1 + i_2 + i_3 + i_4} \tag{1-9.9}$$

$$\Delta y = \frac{(i_1 + i_2) - (i_3 + i_4)}{i_1 + i_2 + i_3 + i_4} \tag{1-9.10}$$

实验系统图如图 1-9.9 所示。

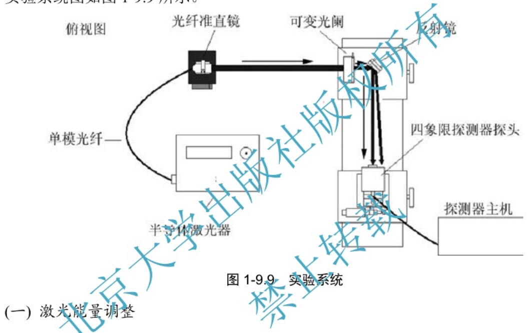


图 1-9.9　实验系统

(一) 激光能量调整

(1) 调节激光束，高度适中，水平与台面平行，作为主光轴(中心高)。

(2) 打开四象限探测器软件，单击软件界面左下方的 apply 按钮，开始实时测量。调节激光能量，使软件上显示的 4 个象限的最大电压值小于 5.000V，微调探测器的丝杆，使软件上显示的光斑中心的偏移量接近 0，再调激光能量，使软件上显示的 4 个象限的最大电压值为 4V 多即可。

(二) 测量光斑定位的盲区

让光斑打在某个象限，在一定范围内转动水平丝杆或垂直丝杆，使光斑在该象限内产生位移，观察此时屏幕上显示的光斑位置图和光斑坐标值，当电压读数值有 3 个为 0 时，屏幕上显示的光斑坐标值为 1 或者−1，此时继续转动水平丝杆或垂直丝杆，判断该范围内是否会影响屏幕上定位出的中心位置产生变化。实验数据填入表 1-9.1 和表 1-9.2 中。

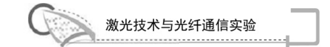


表 1-9.1　光斑水平定位盲区

	盲区最左边的水平丝杆位置_____mm	盲区最右边的水平丝杆位置_____mm
电压读数值/V	v_1= v_2= v_3= v_4=	v_1= v_2= v_3= v_4=
X 显示值		
Y 显示值		

表 1-9.2　光斑垂直定位盲区

	盲区最上边的垂直丝杆位置_____mm	盲区最下边的垂直丝杆位置_____mm
电压读数值/V	v_1= v_2= v_3= v_4=	v_1= v_2= v_3= v_4=
X 显示值		
Y 显示值		

从上面表中可以看出，当软件测量光斑的 X 与 Y 的显示值分别为________，为什么会这样？这说明了光斑进入盲区以后，再在某个方向改变光斑的位置，软件不能测出光斑实际位置变化。所以，后面的实验测量中，应避免进入测量盲区，否则，数据不准确。

(三) 四象限探测器测量标定实验

实验步骤如下。

(1) 调节激光束，高度适中，水平与台面平行，作为主光轴(中心高)。

(2) 打开四象限探测器软件，单击软件界面左下方的 apply 按钮，开始实时测量。

(3) 让激光束射入四象限探测器中心。在软件上单击左下方的 sheet2 键，当光斑位置稳定后，单击 stop 键。记录下此时软件显示的坐标数值，记为 X_1，Y_1。转动丝杆，使四象限探测器在 X 方向移动。同样，记录下软件显示的坐标数值，记为 X_2，Y_2。根据丝杆刻度，记录转动距离 x_L。同时利用坐标公式 $\Delta d=\sqrt{(X_1-X_2)^2+(Y_1-Y_2)^2}$，计算出软件显示的光斑中心变化距离 Δd，比较 Δd 和 x_L。同样方法，可以测量在 Y 方向的位移量 y_L，并进行比较。实验数据填入表 1-9.3、表 1-9.4 中。

表 1-9.3　四象限标定实验数据(X 方向)

水平丝杆位置 1	光斑坐标 X_1，Y_1		水平丝杆位置 2	光斑坐标 X_2，Y_2		丝杆转动距离 x_L	坐标距离 Δd



续表

水平丝杆位置 1	光斑坐标 X_1，Y_1		水平丝杆位置 2	光斑坐标 X_2，Y_2		丝杆转动距离 x_L	坐标距离 Δd

表 1-9.4　四象限标定实验数据(Y 方向)

垂直丝杆位置 1	光斑坐标 X_1，Y_1		垂直丝杆位置 2	光斑坐标 X_2，Y_2		丝杆转动距离 y_L	坐标距离 Δd

丝杆水平方向移动时，经 MATLAB 拟合 Δd 与 x_L 的测量值与一次线性关系曲线表达式：$x_L = f(\Delta d) =$ ____________________；

同理，丝杆在垂直轴方向移动时，经 MATLAB 拟合 Δd 与 y_L 的测量值与一次线性关系曲线表达式：$y_L = f(\Delta d) =$ ____________________。

(四) 目标方向的改变量测量

(1) 调节激光束调节高度适中，水平(与台面平行)，作为主光轴(中心高)。

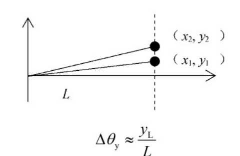
(2) 调整四象限探测器位置。使光束可以打到四象限探测器的中心。

(3) 打开四象限探测器软件，单击软件界面左下方的 apply 按钮，开始实时测量。当光斑位置稳定后，单击 stop 按钮。记录下此时软件显示的坐标数值，记为 X_1，Y_1。

(4) 单击软件界面左下方的 apply 按钮，开始实时测量。微动反射镜，四象限探测器靶面上的光斑位置发生一定变化。当光斑位置稳定后，单击 stop 按钮。记录下此时软件显示的坐标数值，记为 X_2，Y_2。利用坐标公式 $\Delta d = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}$，计算出软件显示的光斑中心变化距离 Δd。利用实验内容(三)的拟合曲线结果，算出光斑的实际位置改变量 x_L 和 y_L。

(5) 根据反射镜到四象限探测器距离 L 和光斑移动距离 x_L 和 y_L，计算目标的方位角的改变量。实验结果填入表 1-9.5 中。

$$\Delta\theta_x = \arcsin\frac{x_2}{L} - \arcsin\frac{x_1}{L} \approx \frac{x_2}{L} - \frac{x_1}{L} = \frac{x_2 - x_1}{L} = \frac{x_L}{L}$$



同理：

$$\Delta\theta_y \approx \frac{y_L}{L}$$

表 1-9.5　目标方向改变量测量，反射镜中心到四象限探测器距离 L=________mm

光斑坐标 X_1，Y_1		光斑坐标 X_2，$Y2$		光斑移动距离 Δd	拟合 x_L	拟合 y_L	$\Delta\theta_x$	$\Delta\theta_y$

六、实验数据与分析

完成前面表 1-9.1～表 1-9.5 和其他数据记录，并分析实验现象和实验结果。

七、注意事项

(1) 禁止激光束射入人眼，避免伤害眼睛。

(2) 插拔光纤连接器时，动作要轻，防止把光纤扯断。

八、思考题

根据实验体会，分析影响定向精度的因素有哪些。

九、测量软件介绍(图 1-9.10、图 1-9.11)

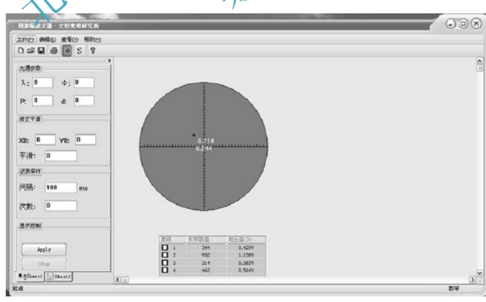


图 1-9.10　测量软件界面 1

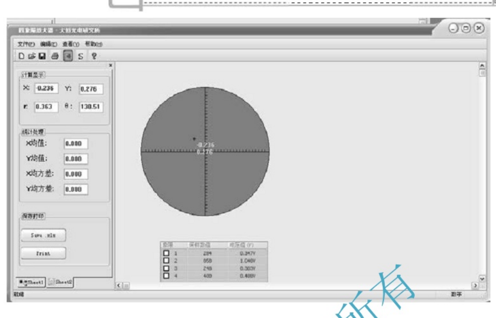


图 1-9.11　测量软件界面 2

界面中的右边圆形绿色区域表示光探测器的探测区域，分为 4 个象限。其中的红色小点表示接收到的激光光斑。

实验 10

激光相位测距实验

一、实验目的

(1) 了解激光相位测距的原理。

(2) 了解激光脉冲测距与激光相位测距的特点。

(3) 了解激光调制的基本原理。

(4) 了解高频信号经混频后变为低频信号的技术。

(5) 了解差频测相和脉冲法测相位的基本原理。



二、实验内容

搭建实验系统，调整光路，用半导体激光测量一定范围内的距离，分析测量误差。

三、实验原理

激光测距是激光技术、光电检测技术、电子技术和精密机械等多种技术的综合及典型应用，在军事国防、航空航天、大地测量、工程测量等领域有着广泛的应用。激光测距主要有脉冲法测距和相位法测距两种，其共同点是通过直接或间接地测量激光在被测距离上往返所需的时间。脉冲法测距的精度相对较低，高精度测距基本上都采用相位法测距。

(一) 脉冲测距原理

脉冲测距的原理是：由激光器对被测目标发射一个光脉冲，然后接收由目标反射回来的光脉冲，通过测量光脉冲往返所经过的时间算出目标距离。

脉冲测距仪的测距原理框图如图 1-10.1 所示。

它由 3 个系统构成，即激光发射系统、接收系统和计数系统。激光发射系统发射峰值功率高、发散角小的激光脉冲。接收系统接收由目标漫反射回来的极微弱的激光脉冲，把它转换为电脉冲信号加以放大。计数系统对激光脉冲往返所经时间进行计数得出所测距离并显示出来。为了计算需要，发射脉冲前，复位电路工作，把所有计数器清零，等待计数。当激光脉冲发出瞬间，由取样器对接收系统提供一个光脉冲作为计数系统的起始参考信号，把门打开，时标脉冲进入计数器计数。当回波脉冲到达后，门控电路再次翻转，把门关闭，计数结束。此时计数器所计的数对应于所测距离，由显示部件显示出来。

门控电路接收到的参考脉冲和回波脉冲及计数器接收到的计数脉冲如图 1-10.2 所示。

假设 τ 为两个时标脉冲周期，计数脉冲个数为 n，光的传播速度为 c，则测量的距离 L 为

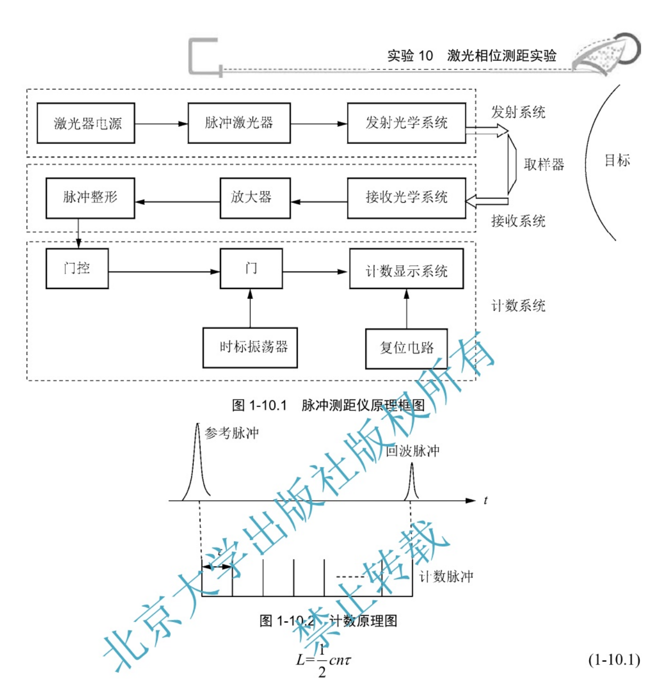


图 1-10.1　脉冲测距仪原理框图

图 1-10.2　计数原理图

$$L=\frac{1}{2}cn\tau \tag{1-10.1}$$

脉冲测距的测量精度与时标脉冲的宽度、频率和激光脉冲的上升时间有关。时标脉冲宽度越窄、频率越高、激光脉冲的上升时间越短，测量精度越高。

目前已有许多种脉冲激光测距仪，它们主要是发射系统有较大的差别。例如：用半导体激光器作为发射系统的测距仪，具有作用距离近，体积小、轻便的特点，适用于近距离(2km 以内)使用。用 Nd:YAG 调 Q 激光器作为发射系统的测距仪的发射波长为 1064nm 的近红外光，不可见光，隐蔽性好，广泛用于军事领域。红宝石激光器工作波长为 694.3nm，为可见光，适合于气象研究等。CO_2 激光器的工作波长为 10600nm，为远红外光，在大气中传播损失最小，功率也大，最适合军事目的。锁模巨脉冲激光器，脉冲宽度为 ps，可以获得很高的测距精度和作用距离。

(二) 相位测距原理

相位测距仪的测量原理：由光源发出光强度按照某一频率 f 变化的正弦调制光波，光波的强度变化规律与光源的驱动电源的变化完全同相，出射的光波到达被测目标。被测距

离上放有一块反射棱镜作为被测的合作目标，这块反射棱镜把入射光束反射回去，而且保证反射光的方向与入射光方向完全一致。在仪器接收端获得调制光波的回波，经光电转换后，得到与接收的光波调制频率相位完全相同的电信号。此电信号经放大后与光源的驱动电压相比较，测得两个正弦电压的相位差。根据所测相位差计算得到所测距离。

相位测距仪的发射光波波形和接收光波波形如图 1-10.3 所示。

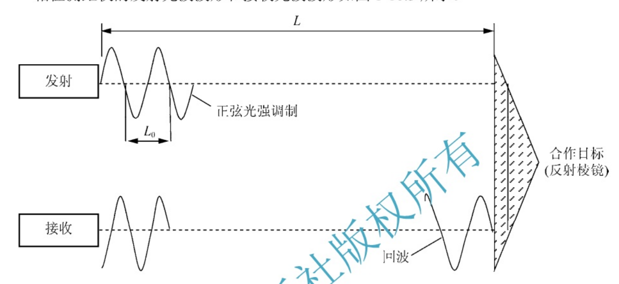


图 1-10.3　相位测距仪的发射和返回光波

设正弦波频率(调制频率)为 f_0，被调制激光光波在待测距离 L 上往返传播的时间为 t_L，其相移为 φ (单位 rad)，设在起始时刻 t_1 发射的调制光光强为

$$I_1 = A\sin(\omega t_1 + \varphi_0) \tag{1-10.2}$$

接收时刻的调制光强为

$$I_2 = A\sin(\omega t_1 + \omega t_L + \phi_0) \tag{1-10.3}$$

则接收与发射时刻的相位差为

$$\varphi = (\omega t_1 + \phi_0) - (\omega t_1 + \omega\, t_L + \phi_0) = \omega\, t_L = 2\pi f_0\, t_L \tag{1-10.4}$$

在被测距离上的往返时间为

$$t_L = \frac{\varphi}{2\pi f_0} \tag{1-10.5}$$

于是，可求得被测距离是

$$L = \frac{c \cdot t_L}{2} = \frac{c}{2} \cdot \frac{\varphi}{2\pi f_0} \qquad c\text{ 为光速} \tag{1-10.6}$$

式(1-10.6)表明只要测出相位差 φ 即可求出被测距离 L。

若相位差 φ 的单位为度(°)时，式(1-10.6)变为

$$L = \frac{c \cdot \varphi}{2 \times 360^\circ \times f_0} \tag{1-10.7}$$

又因为被频率为 f_0 的正弦波调制的激光束，其传播周期 L_0 为

$$L_0 = \frac{c}{f_0} \tag{1-10.8}$$



如图 1-10.4 所示，假设在发射与接收之间的时间里，产生的相位差为

$$\varphi = N2\pi + \Delta\varphi \qquad N = 0,1,2,3,\cdots \tag{1-10.9}$$

把式(1-10.9)代入式(1-10.6)得

$$L = \frac{c}{2f_0}\left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) = \frac{L_0}{2}(N + \Delta N) \tag{1-10.10}$$

式中：$\Delta N = \dfrac{\Delta\varphi}{2\pi}$。

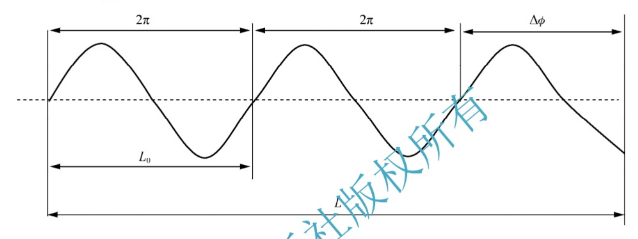


图 1-10.4　发射到接收之间的相位差

由式(1-10.10)和图 1-10.4 可见，相位测距的方法相当于用 $L_0/2$ 的调制波测量距离。即把 $L_0/2$ 当成了一把测量距离的尺子，先纪录 N 个整尺长，然后纪录其尾数 ΔN，最后将两者加起来就是所求长度。例如有一段距离，用 50m 的尺子去丈量，得到有 5 个整尺，所余尾数为 26.34m，则这段距离为 L=50×5+26.34=276.34m。

但是，目前相位测距仪不能直接测得 N，只能直接得到尾数 $\Delta\varphi$。因此实际上是采用几种不同的调制频率工作，得到几把长度不同、精度不同的测量尺子去测量，然后把几次测量结果组合起来，得到确切的距离。例如，现在有一段距离需要测量，大概有几百米(不会超过 600m)。激光相位测距仪用一个调制频率为 500kHz 的测量档测量，该挡的测量尺长为 $L_0/2 = c/2f_0$ =300m，用这个尺子测量，结果为 137m，有近 2m 的误差。再用 15MHz 的另一测量挡进行一次测量，此时，测量尺长为 $L_0/2 = c/2f_0$ =10m，用这个尺子测量，结果为 15.1m，误差为 0.2m 左右。此时我们可以确定，这段距离为 135.1m，误差在 0.2m 之内，可见调制频率越大，测量精度越高。

从上面的一个举例中可以看到，通过两次不同频率测量，既获得了大的测量范围，又获得了较高的测量精度。

在激光相位测距技术中使用的激光都是被调制的，即激光强度是按一定频率周期性变化的，调制方法可采用内调制方法：如通过周期性地改变半导体激光器的工作电流使输出光强随之发生周期性的变化。或外调制方法：如使激光穿过一个由起偏器、电光晶体、检偏器组成的系统，并在电光晶体上施加一个按正弦波变化的电压，通过改变激光光束的偏振态来改变光强。

内调制相位测距原理框图如图 1-10.5 所示。

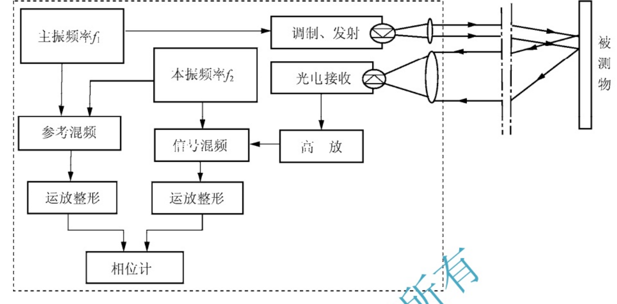


图 1-10.5 激光相位测距原理框图

它主要由以下 3 部分构成。

发射部分：在半导体激光器加入调制信号，使其发射调制光波，经发射物镜准直后出射平行光束至被测物体。

接收部分：由于反射回的光往往非常微弱，因此，采用一种高灵敏度的光电传感器——雪崩光电二极管(APD)，作为光接收元件。接收部分主要有 APD、放大电路和驱动电源构成。接收到的信号十分微弱，经过高频、高增益放大后，送入信号混频器。两个不同频率的信号输入混频器，经混频和选频后，可选出两个频率之差的频率信号，且信号的相位保持不变。通过混频，将高频的距离相位信息变成低频距离的相位信息，目的是提高测距系统测量相位的精度。

相位差计：用来测量、计算、显示驱动信号与接收到的光信号之间的相位差。

四、实验仪器设备

可调制半导体激光器+二维调整架	主机箱	光学导轨
APD 附件+二维调整架	大透镜 f=150mm	小透镜 f=60mm
转接杆	白屏	滑块
三角架		

五、实验步骤

(1) 如图 1-10.6 所示，在光学实验导轨上依次安装 APD、大透镜和白屏，在大透镜的不锈钢杆上同时安装转接杆和半导体激光器(LD)，其中 APD 距大透镜约 150mm，白屏距大透镜 400～500mm，白屏所在位置即为被测目标。(如果测量距离较远，可以用平面反射棱镜代替白屏，以获得较强的反射光)

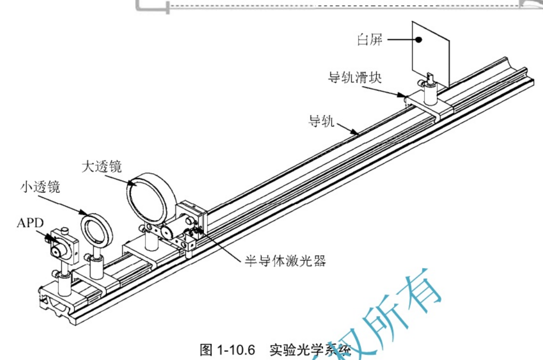


图 1-10.6　实验光学系统

(2) 实验主机面板如图 1-10.7 所示。将 LD 与机箱 LD 驱动插座相连，APD 与机箱 APD 驱动和 APD 光信号相连。将电流、调制深度、APD 电压逆时针旋到头，调制频率调到直流挡。接通 220V 电源，打开电源开关。

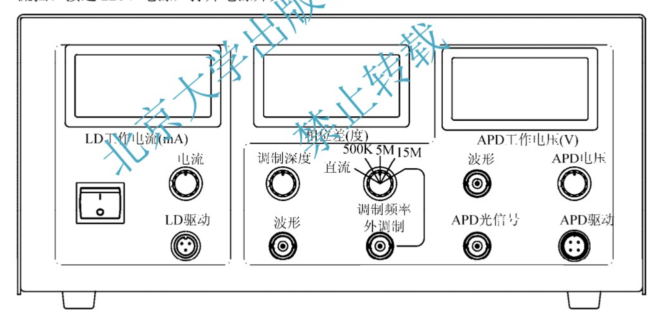


图 1-10.7　实验主机箱面板

(3) 顺时针旋转电流旋钮，直到 LD 工作电流达到最大，LD 发出红色激光。

(4) 取下导轨上的白屏和小透镜，将激光打到测量目标上，如远处的白色墙面或三角架上的白屏。在大透镜后面用白屏仔细寻找反射回来的激光光斑。由于远处反射表面可能是漫反射表面，因此反射回的光斑可能非常微弱，请认真仔细地寻找。

(5) 仔细调整 LD 的指向和大透镜与 APD 之间的相对位置，使激光光斑焦点打在 APD 探测器的小透镜上。

(6) 将示波器的两个通道分别与机箱波形插座相连，以调制深度旋钮下的波形作为示波器的触发信号。

(7) 为防止调制频率换档时，对 LD 冲击过大，先将电流旋钮逆时针旋转，将 LD 工作电流降低，将调制频率调到 500kHz，顺时针旋转电流、调制深度和 APD 电压旋钮，观察 APD 光信号的波形变化。仔细调整这 3 个旋钮，使 APD 光信号尽量的完美，体会 LD 工作电流、调制深度和 APD 电压的作用，改变 APD 电压，观察光信号波形的幅度变化，估计 APD 的雪崩电压。

(8) 分别在 5MHz 和 15MHz 的调制频率上重复步骤(7)的操作，仔细体会 LD 工作电流、调制深度和雪崩电压的作用和影响，了解 LD 和 APD 的特性和工作条件。

(9) 选定一个调制频率做距离测量，如 500kHz，仔细调整光路和激光器工作电流、调制深度和 APD 的反向偏压，将 APD 光信号调到最佳(信号无震荡，较大的信号幅度和较小的噪声)，在示波器上估算两个信号的相位差。取下示波器信号线，从相位差表头读取相位差计指示值(示波器信号线对相位差指示值有一定的影响)，前后小幅度移动被测目标，判断相位差的符号是“正”还是“负”。记下这个值 A。

(10) 将白屏和小透镜放回到导轨的滑块上，仔细调整 LD 的指向和小透镜的位置，使导轨白屏上的光斑成像在 APD 上，重新连接示波器信号线，观察接收到的信号波形。调整 APD 位置，使信号幅度与步骤(9)中的信号幅度大致相同(不可再调整工作电流、调整深度和反向偏压旋钮)。在示波器上再次估算两个信号的相位差，并与步骤(9)中的示波器估算值相比较。取下信号线，前后小幅度移动被测目标(白屏)，判断相位差的符号是“正”还是“负”。记录下此时的相位差计指示值 B。

(11) 从标定曲线图中查出 A、B 对应的相位差值，两值相减即为两点之间的相位差 $\Delta\varphi$。根据 500kHz 的光波调制波长和 $\Delta\varphi$，可求出两点之间的距离。

特别注意：在步骤(9)中第一次调整好 APD 光信号后，LD 工作电流、调制深度和 APD 电压都应尽量不动，以尽量减少误差。

(12) 换一个调制频率，如 15MHz，重复步骤(9)、(10)、(11)中的操作，体会调制频率对测量精度的影响，提高上次测量的精度。

本实验系统的测量相位差标定后的曲线如图 1-10.8 所示。

其中，水平轴为测量距离，垂直轴为相位计表头指示值。相位差曲线斜率的正负由测量过程中，相位读数随距离变化情况决定。

如果测量相位读数经过曲线拐点，则相位差要特殊计算。如 L_1 处测得相位差为 150°，经过短距离(1m)再测得相位差为 170°，经过短距离(1m)再测得相位差为 165°，则前 1m 的相位差为 170°−150°=20°。后 1 米的相位差为(180−170)°+(180−165)°=25°。

在实验中需注意的是表头的指示值是半导体激光器的驱动信号与接收到的光信号之间的相位差，这里不仅包含有测量距离引起的相位差，还包含有电路本身的相位差，我们在实验中要通过减去测量起点处的相位差来求出测量距离引起的相位差。

由于电路本身的缺陷，在曲线的顶端和尾端有比较大的误差。测量时应尽量避免。



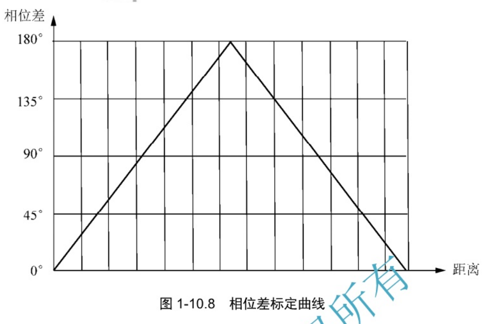


图 1-10.8　相位差标定曲线

六、注意事项

绝对避免激光束直射人眼，只能从侧面观察激光散斑。

七、实验数据与分析

分别在调制频率为 500kHz、5MHz、15MHz 下进行测量，记录相应的实验数据，并分析实验误差。表 1-10.1～表 1-10.3 中，L 表示白屏到光源的距离。

表 1-10.1　调制频率为 500kHz，APD 工作电流为______，APD 电压为_____

L/m											
表头读数 φ/°											
1 米的相位差 $\Delta\varphi$/°											
计算距离											
测量误差											

表 1-10.2　调制频率为 5MHz，APD 工作电流为_____，APD 电压为_____

L/m											
表头读数 φ/°											

续表

1米的相位差Δφ/°											
计算距离											
测量误差											

表 1-10.3　调制频率为 15MHz，APD 工作电流为_____，APD 电压为_____

L/m											
表头读数φ/°											
1米的相位差Δφ/°											
计算距离											
测量误差											

八、思考题

(1) 试观察并说明改变调制频率与测相精度的关系。

(2) 试观察并说明改变激光功率的大小能否提高测距精度。

第二篇　光纤通信实验

实验 1

光纤切割与焊接技术实验

一、实验目的

(1) 了解光纤的结构和光纤电弧放电焊接原理。
(2) 熟悉光纤的处理，如去除涂覆层、切割等。
(3) 了解全自动焊接光纤的过程和光纤熔接机的使用方法。

二、实验内容

(1) 准备待熔接的光纤，切割光纤。
(2) 用全自动光纤熔接机对光纤进行熔接。

三、实验原理

(一) 光纤的结构和导光原理

光纤是光波的传输通道，即光信号传播介质，它具有束缚和传播光能量的作用。光纤的典型结构是多层同轴圆柱体，如图 2-1.1 所示，由内而外分别是纤芯、包层和涂覆层。

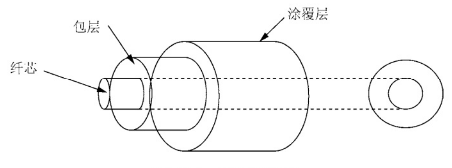


图 2-1.1　光纤的结构图

光纤按照折射率分布的不同可以分为阶跃型光纤和渐变型光纤，如图 2-1.2 所示。

1. 阶跃型光纤

如图 2-1.2(a)所示，阶跃型光纤的纤芯折射率 n_1 沿半径方向保持一定，包层折射率 n_2 沿半径方向也保持一定，在边界处，纤芯和包层的折射率成阶梯型变化。这种光纤也称为均匀光纤，折射率分布为

$$n(r)=\begin{cases} n_1 & r \leqslant a \\ n_2 & r > a \end{cases} \tag{2-1.1}$$

式中：a 为纤芯半径；r 为光纤半径。

2. 渐变型光纤

如图 2-1.2(b)所示，渐变型光纤的纤芯折射率 n_1 随半径增大而逐渐减小，直到包层变为 n_2，折射率分布为

$$n(r)=\begin{cases} n_1[1-\Delta(r/a)^{\alpha}] & r \leqslant a \\ n_2 & r > a \end{cases} \tag{2-1.2}$$

式中：α 为折射率分布指数，一般取 1～∞。当 $\alpha=2$ 时，折射率按平方律(抛物线)变化。当 $\alpha \to \infty$ 时，折射率分布变为阶跃型。

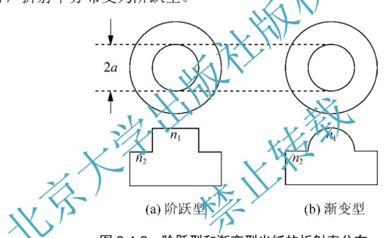


图 2-1.2　阶跃型和渐变型光纤的折射率分布

光纤按原材料的不同，主要可以分为以下 4 种。

(1) 石英光纤。这种光纤的纤芯和包层均由高纯度的 SiO_2 经过适当的掺杂制成，其损耗低、强度和可靠性较高。

(2) 多组分玻璃光纤。一般用钠玻璃(SiO_2、Na_2O、CaO)经适当掺杂制成。其损耗低，但可靠性较差。

(3) 塑料包层光纤。纤芯采用 SiO_2 制成，包层由硅树脂制成。

(4) 全塑光纤等。纤芯和包层均用塑料制成。这种光纤损耗较大，可靠性较差，但价格较低。

目前，石英光纤应用最广泛，在通信中常使用这种光纤。在通信光纤中，纤芯由高纯度的 SiO_2 掺入 GeO_2 和 P_2O_5 等杂质制成，是光波的主要传输通道。包层则是在高纯度的 SiO_2 中掺入 B_2O_5 和氟化物等杂质，折射率略低于纤芯，为光的传输提供反射面和光隔离，并提供一定的机械保护，使光纤的传输性能稳定。涂覆层包括一次涂覆层、缓冲层和二次涂覆层，一般由有机材料和塑料构成，主要保护光纤不受水汽的侵蚀和机械擦伤，同时增

加光纤的柔韧性，从而延长光纤寿命。

光纤导光的特性基于光射线在纤芯和包层界面上的全反射，使光线约束在纤芯中传播，如图 2-1.3 所示。

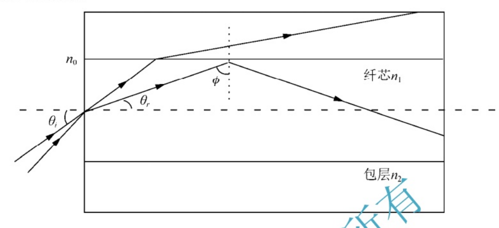


图 2-1.3　光纤导光原理示意图

当一条光线与光纤轴成 θ_i 的角度入射到光纤中，由于光纤与空气界面的折射效应，光线进入光纤后，以角度 θ_r 向轴线偏移折射，由折射定律可得

$$n_0 \sin\theta_i = n_1 \sin\theta_r = n_1 \cos\phi \tag{2-1.3}$$

式中：n_0 为空气折射率；ϕ 为光线从纤芯到包层的入射角。折射光线将会沿着与光纤轴线成 θ_r 角度的方向入射到纤芯与包层界面上。因为包层折射率 n_2 低于纤芯折射率 n_1，可以在此界面上定义满足全反射条件的临界角 ϕ_c

$$\sin\phi_c = n_2 / n_1 \tag{2-1.4}$$

当 $\phi=\phi_c$ 时，折射角为 90°，光线沿交界面向前传播。当 $\phi<\phi_c$ 时，光线在交界面折射进入包层并逐渐消失，形成泄露光线。当 $\phi>\phi_c$ 时，光线将在纤芯和包层的交界面发生全反射而返回纤芯，以折线形状向前传播。这样所有满足 $\phi>\phi_c$ 条件的光线都会被限制在纤芯中向前传输，这就是光纤传光的基本原理。由式(2.1-3)和(2.1-4)可以得到 ϕ_c 决定的入射光线的最大临界角 $\theta_c=(n_1^2-n_2^2)$，θ_c 也称为光纤的收光角。在此基础上引入一个重要参量——数值孔径(Numerical Aperture，NA)，在 $n_1\approx n_2$ 的情况下，数值孔径可以近似表示为

$$NA = n_0 \sin\theta_c = n_1(2\Delta)^{1/2}, \qquad \Delta = (n_1 - n_2)/n_1 \tag{2-1.5}$$

式中：Δ 是纤芯与包层折射率的相对变化，称为相对折射率差；NA 表示光纤接收和传播光的能力。

(二) 光纤的切割

光纤在熔接之前，需要使用光纤切割刀进行光纤端面的制备。光纤端面制作的好坏将直接影响接续质量，所以在熔接前，必须首先制作合格的端面。端面须为平整镜面，并且垂直于光纤轴，同时要求边缘整齐、无缺损和毛刺。常见的光纤切割刀有两种，一种是笔式切割刀，如图 2-1.4(a)所示，另外一种是精密切割刀，如图 2-1.4(b)所示。笔式切割刀的切割质量远达不到熔接的要求，不能处理熔接端面，只能用于简单的临时测试，比如用于

裸光纤适配器的临时连接测试，而对于熔接端面的处理只能使用精密切割刀。



（a）笔式切割刀



（b）精密切割刀

图 2-1.4　光纤切割刀

不同厂家生产的精密切割刀的结构大同小异，其原理和使用方法基本相同，大致结构如图 2-1.5 所示。

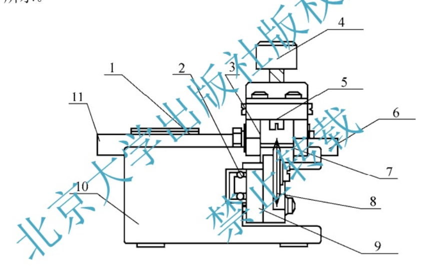


图 2-1.5　精密切割刀结构示意图

1—小压板；2—精密导轨；3—上压板；4—按键；5—砧板；6—支座；
7—下压板；8—圆片刀；9—滑座；10—基座；11—光纤夹板

图 2-1.5 所示的机械式光纤切割器采用精密圆片刀对光纤进行切割。圆片刀通常采用进口超细颗粒钨钢做原材料，经加工工艺生产而成。光纤切割的具体工作原理如图 2-1.6 所示，将裸光纤装夹在上下压板之间，滑动的圆片刀在绷紧的裸光纤表面留下微裂纹，当按下按键时，砧板接触裸光纤使微裂纹扩展而切断光纤。

(三) 光纤的熔接

1. 光纤熔接原理

光纤永久性连接是通过熔接技术将两根光纤连接在一起。而基于同样基质材料的纤芯和包层才是光纤传光的主要结构。因此，在熔接的时候，需要去除涂覆层，只对两根光纤接头的纤芯和包层部分进行熔接。



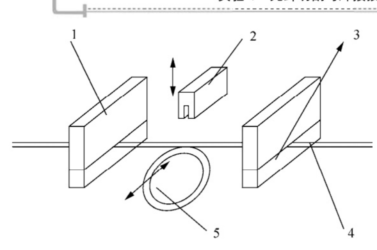


图 2-1.6　精密切割刀原理示意图

1—上压板；2—砧板；3—下压板；4—裸光纤；5—圆片刀

光纤熔接的方法很多，通常以电弧熔接法最为优越，应用最为广泛。电弧熔接法是利用光纤高温熔融和高压尖端放电产生高温电弧的原理对光纤进行熔接的。这种熔接通常是在专用的光纤熔接机上进行的。熔接时首先将光纤的保护层剥掉，将光纤端面切割平整，安装在 V 形槽内，用微调架将光纤端面对准，在两个高频高压电极作用下，产生电弧放电，弧焰温度可达上千度。在电弧高温作用下，光纤熔融连接在一起，其原理如图 2-1.7 所示。调整放电电流，可改变弧焰温度，对不同的光纤(多模、单模)放电电流通常是不同的。

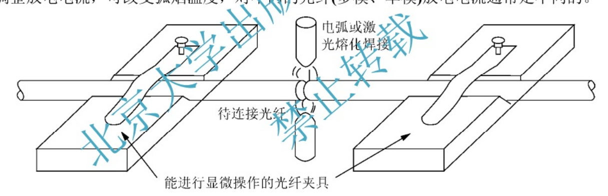


图 2-1.7　光纤熔接原理示意图

2. 光纤熔接机

光纤熔接机主要用于光纤通信领域，是光纤光缆施工和维护必不可少的接续工具。光纤熔接机可以实现光纤与光纤之间的永久性连接，即固定连接。光纤熔接机的种类很多。按照操作方式的不同，可以分为半自动熔接机和自动熔接机。半自动光纤熔接机如图 2-1.8 所示，通过人工在显微镜下对待熔接的两根光纤进行调节并对准，再进行放电熔接过程，这里需要人工对光纤进行对准，因此从很大程度上限制了精度，一般用来对多模光纤进行熔接。

自动熔接机如图 2-1.9 所示，调芯机构精密，可自动校准，能用于单模光纤的熔接，是目前应用最广泛的光纤熔接机。目前，光纤熔接机都采用了图像处理技术，可以自动设定光纤端面位置，可以进行光纤的自动对芯和自动熔接，并可显示垂直和水平两个方向的

光纤对芯和熔接情况。还可以根据芯轴偏差和倾斜程度估算出接续损耗并显示出来。这种仪器在光纤通信领域中应用十分广泛。



图 2-1.8　半自动光纤熔接机

图 2-1.9　自动光纤熔接机

四、实验仪器设备

全自动光纤熔接机	光纤切割刀	待焊光纤
光纤剥皮钳	无水乙醇	脱脂棉

五、实验步骤

(1) 对光纤端面进行处理，露出裸光纤 20～30 mm 长。针对二次涂覆光纤，首先应去除套塑层，用光纤套塑剥离钳按要求去除尼龙层，剥除后根部应平整，并把尼龙残留物去除。对一次涂覆光纤则要去除一次涂覆层，采用剥纤钳进行去除，并用蘸乙醇的脱脂棉将裸光纤擦拭干净，不留残余物。

(2) 将光纤穿过热缩管。熔接完成后，可以用热缩管保护光纤熔接头。

(3) 用光纤切割刀切断光纤，使光纤端面整齐。端面制作好以后的裸光纤长度约为



20mm。光纤精密切割刀的具体使用方法如下。

① 打开上固定座及小压板。

② 用棉球沾无水酒精将裸纤擦拭干净。

③ 按所需长度将光纤放入光纤夹板(若为带状光纤，应确信各光纤没有交叉)。

④ 先合上小压板，再合上固定座。

⑤ 右手扶住刀座按箭头方向，轻轻滑动刀座，让圆片刀轻轻滑过光纤。

⑥ 轻柔地按下按键，使砧板接触光纤而切断光纤。

⑦ 打开上固定座及小压板，取出光纤及断头。

(4) 打开熔接机电源，选择合适的熔接方式。熔接机的供电电源有交流和直流两种，要根据供电电源的种类来合理开关。

(5) 放置光纤。将光纤放在熔接机的 V 形槽中，小心压上光纤压板和光纤夹具，要根据光纤切割长度设置光纤在压板中的位置，并正确地放入防风罩中。

(6) 按照同样的方法准备好待接续的另一根光纤，关闭防风盖。

(7) 接续光纤。按下接续键后，光纤相向移动，移动过程中，产生一个短的放电清洁光纤表面，当光纤端面之间的间隙合适后熔接机停止相向移动，设定初始间隙，熔接机测量并显示切割角度。在初始间隙设定完成后，开始执行纤芯或包层对准，然后熔接机减小间隙(最后的间隙设定)，高压放电产生的电弧将左边光纤与右边光纤相熔接，最后微处理器计算损耗并将数值显示在显示器上。如果估算的损耗值比预期的要高，可以再次放电，放电后熔接机仍将计算损耗。

(8) 移出光纤并用加热器加固光纤。打开防风罩，将光纤从熔接机上取出，再将热缩管放在裸纤中心，放到加热器中加热，完毕后从加热器中取出光纤。操作时，由于温度很高，不要触摸热缩管和加热器的陶瓷部分。

六、注意事项

(1) 剥离涂覆层时，需要小心轻柔，防止裸光纤的断裂。

(2) 将切割后的裸光纤放置到光纤熔接机的 V 形槽时，不要碰触到端面，防止影响端面的平整度。

(3) 熔接过程结束取出光纤后，盖上防风罩，对熔接机进行复位。

七、思考题

光纤熔接缺陷有哪些形式，造成熔接失败的原因有哪些？

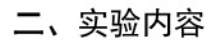
实验 2

插入法测光纤的平均损耗系数

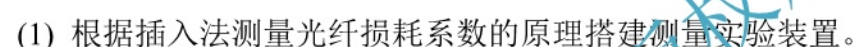
一、实验目的

(1) 掌握插入法测量光纤损耗系数的原理。

(2) 熟悉光功率计的使用方法。



二、实验内容



(1) 根据插入法测量光纤损耗系数的原理搭建测量实验装置。

(2) 用插入法测量光纤损耗系数。

三、实验原理

(一) 光纤的损耗

由于光纤存在损耗，信号在传输过程中幅度会逐步减小，光信号要想实现长距离的传输，就必须减少传输中的损耗。因此，光纤损耗是光纤的重要特性之一。当入纤光功率和接收机灵敏度给定之后，光纤的传输损耗就成为决定系统无中继传输距离的重要因素。

在一般情况下，光信号在光纤中沿 z 轴传输时，光功率 P 沿距离 z 的变化可以表示为

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}z}=-\alpha P \tag{2-2.1}$$

式中：α 为损耗系数。如果 P_{in} 为在长度为 L 的光纤输入端输入的光功率，则输出功率 P_{out} 可表示为

$$P_{\text{out}}=P_{\text{in}}\exp(-\alpha_{P}L) \tag{2-2.2}$$

这是一个自然对数的指数衰减形式，习惯上为了方便，通常将光纤的损耗系数定义为常用的对数形式，单位为 dB/km，表示为

$$\alpha=-\frac{10}{L}\lg\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \tag{2-2.3}$$

在光纤通信系统中，为了方便计算和分析，通常将光功率的线性单位转化成对数单位，定义为分贝毫瓦(dBm)，即以 1mW 为基准、用分贝表示功率的绝对值，表示为

$$P(\text{dBm})=10\lg\left[\frac{P(\text{mW})}{1(\text{mW})}\right] \tag{2-2.4}$$

例如，1mW=0dBm，2mW= 3dBm。同时，在进行两个绝对值功率的比较时，可用分贝(dB)来表示功率比值，为



$$P_{1-2}(\mathrm{dB}) = 10\lg\left[\frac{P_1(\mathrm{mW})}{P_2(\mathrm{mW})}\right] = P_1(\mathrm{dBm}) - P_2(\mathrm{dBm}) \tag{2-2.5}$$

例如，当功率比值绝对值为 10 时，对应 10dB 的对数值。可以看出通过这样的单位转换，能够把较复杂的功率运算变得简单。同样，在进行损耗计算时就可以将较为复杂的指数运算转化成简单的加减法运算。当光功率单位采用 dBm 时，式(2-2.3)可以变换为

$$\alpha(\mathrm{dB/km}) = \frac{P_{\mathrm{in}}(\mathrm{dBm}) - P_{\mathrm{out}}(\mathrm{dBm})}{L} \tag{2-2.6}$$

图 2-2.1 给出了典型单模光纤的损耗谱。损耗谱表明光纤通信有 3 个传输窗口：850nm、1310nm 和 1550nm。典型的损耗值在 850 nm 波长处约为 2.5dB/km，1310nm 波长处约为 0.5 dB/km，在 1550 nm 波长附近，光纤损耗值最小，仅约 0.2 dB/km。随着光纤制造工艺的进步，损耗已经越来越接近理论值。表 2-2.1 给出了以 GeO_2-P_2O_5-SiO_2 材料为纤芯的光纤在各损耗窗口的损耗的理论最低极限值以及已经达到的最低值。

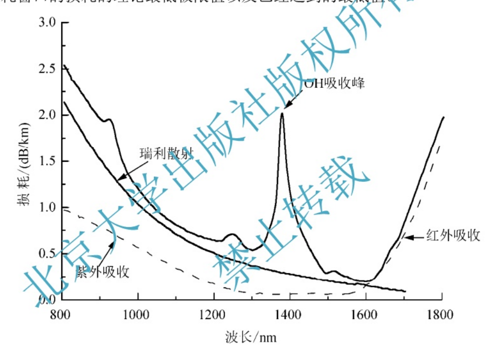


图 2-2.1　光纤损耗谱特性

表 2-2.1　光纤损耗谱特性

波长/nm	单模光纤		多模光纤	
	理论最低极限值/(dB/km)	已达到的最低值/(dB/km)	理论最低极限值/(dB/km)	已达到的最低值/(dB/km)
850	1.9	1.9	2.5	2.12
1310	0.32	0.35	0.44	0.42
1550	0.15	0.154	0.22	0.23

引起光纤损耗的因素非常复杂，损耗系数是各损耗机制的共同体现。对于通信用石英光纤来说，在 800 nm 到 1800 nm 波长范围内，产生传输损耗的因素从机理上可以分为 3

类：第一类是石英光纤的吸收损耗，包括本征吸收和杂质吸收等；第二类为石英光纤的散射损耗，包括瑞利散射、米氏散射、受激拉曼散射和受激布里渊散射等；第三类为附加损耗，包括宏弯损耗和微弯损耗等。具体机制如下。

1. 吸收损耗

当光波通过光纤材料时，有一部分光能转化为热能，从而造成光功率的衰减，这就是吸收损耗。吸收损耗与光纤材料有关，主要包括本征吸收和杂质吸收。

1) 本征吸收

石英材料的本征吸收是指其基本材料，即 SiO_2 的固有吸收，不包括杂质或缺陷引起的吸收损耗，因此，本征吸收基本上确定了光纤材料的吸收下限。吸收损耗的大小与波长有关，对于石英光纤，本征吸收有两个吸收带，一个在红外波段，另一个在紫外波段，如图 2-2.1 中虚线所示。

在红外吸收带(λ>0.7μm)，由于分子谐振吸收能量造成损耗，谐振吸收峰为 9.1μm、12.5μm、21μm，其吸收拖尾延伸至 1.5～1.7μm，因此形成了石英光纤工作波长的上限。

在紫外吸收带(λ<0.4μm)，光纤材料组成的原子系统中，一些处于低能级的电子会吸收光波能量而跃迁到高能级状态，这种电子谐振的吸收峰在 0.16μm 处，吸收峰很强，拖尾延伸至通信波段，波长越短，影响越大。

2) 杂质吸收

由于光纤材料的不纯净或制造工艺不完善而引入杂质时造成了附加损耗，即杂质吸收损耗。影响最严重的因素是过渡金属离子吸收和氢氧根(OH^-)离子吸收。

过渡金属离子包括 Cu^{2+}、Fe^{3+}、Cr^{2+}、Ni^{2+}、Mn^{2+}、Co^{2+}等，其能带结构产生边带吸收峰从而造成损耗。通过工艺改进，可以将这些杂质的含量降低到 10^{-9} 以下，这样其吸收损耗的影响可以忽略不计。

OH^-的振动吸收是造成光纤杂质吸收损耗的主要原因。由于 OH^-的谐振出现在 2.73μm 处，其谐振波长与石英分子谐振的混频波使光纤在 0.95μm、1.24μm 和 1.39μm 处产生较强的吸收。图 2-2.1 中损耗谱的 3 个吸收峰值与之对应。要降低 OH^-的吸收损耗，特别是在 1.39μm 处的吸收峰，需要将 OH^-含量降低到 10^{-8} 以下。如果将光纤中的 OH^-含量降到非常低的水平，使这 3 个吸收峰消除，可以获得 0.8～1.6μm 整个波段上都具有较低损耗的光纤，即全波光纤。

除此之外，在制造光纤过程中用来形成折射率变化所要掺杂的 GeO_2、P_2O_5 和 B_2O_3 等材料也会导致附加的吸收损耗。

2. 散射损耗

由于光纤的材料、形状及折射率分布等缺陷或不均匀，光纤中传导的光散射而产生的损耗称为散射损耗。散射损耗包括线性散射损耗和非线性散射损耗。线性散射损耗主要包括瑞利散射损耗和波导散射损耗；非线性散射损耗主要包括受激拉曼散射和受激布里渊散射损耗。

1) 瑞利散射

制造光纤过程中形成的局部浓度微观漂移，浓度的不均匀性导致折射率在比波长小的尺度上发生随机的变化。这种纤芯折射率起伏不均匀引起的光信号散射就称为瑞利散射。

瑞利散射损耗与光波长的四次方成反比，因此，瑞利散射在短波长区域较为严重，随波长的增加会急剧减小。在长波长区域，瑞利散射大大减小，但是在 1550nm 波长附近，瑞利散射损耗是损耗的主要来源。

2) 米氏散射

理想的光纤具有完整的圆柱对称性，实际上存在缺陷，芯径沿长度发生随机漂移，使光纤产生附加损耗。在大于光波长尺度上出现折射率的非均匀性而引起的散射称为米氏散射。这种散射损耗与波长无关。在制造光纤时控制芯径漂移，使芯径沿光纤长度方向的漂移降低到最小，将变动控制到小于 1%，米氏散射损耗则会小于 0.03 dB/km。

3) 受激散射

光纤中传输的光强大到一定程度时，光纤材料中某些微观粒子将会吸收光能量产生跃迁从而形成受激散射损耗，使输入光的部分能量转移到新的频率分量上。受激散射分为受激拉曼散射和受激布里渊散射。适当选择纤芯直径或限定入纤光功率在受激散射的阈值光功率以下，可以消除受激散射损耗。

3. 附加损耗

当理想的圆柱形光纤受到某种外力作用时，会产生一定曲率半径的弯曲，引起能量泄漏到包层中，这种由能量泄漏导致的损耗称为弯曲损耗。这种附加损耗来源于外部，比如在成缆、施工安装和使用中使光纤扭曲、侧压等造成光纤宏弯曲和微弯曲所形成的损耗，如图 2-2.2 所示。

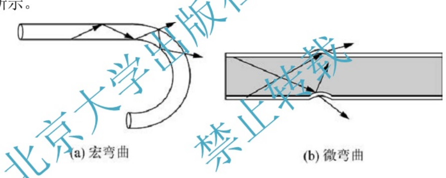


图 2-2.2　光纤的弯曲损耗

1) 宏弯损耗

当光纤弯曲半径比光纤直径大得多，就称为宏弯曲。弯曲损耗正比于 $\exp(-R)$，R 为光纤弯曲的曲率半径。宏弯曲半径比较大时，附加损耗很小，但随着弯曲曲率半径的减小，损耗按指数增大。对单模光纤来说，如果弯曲半径 $R>5$mm，弯曲损耗<0.01dB/km，可以忽略。光纤中大多数弯曲半径都超过了 5mm，所以实际应用中宏弯损耗可以忽略。

2) 微弯损耗

光纤的微弯曲是由于护套不均匀或成缆时光纤与非光滑表面接触受压而产生的随机性扭曲。这种弯曲损耗可高达 100dB/km。对于单模光纤，可以尽量选择归一化频率参数 V 接近截止值 2.405，使模式能量大部分局限在纤芯内的方法来使弯曲损耗减小到最小值。

(二) 损耗的测量

测量光纤损耗的方法很多，CCITT(国际电报电话咨询委员会)提出了 3 种光纤损耗测量基本方法的建议。根据测量损耗原理的不同可以分为截断法、插入损耗法和背向散射法。

实际中一般测量的是传输总损耗，可以提供设计和维护光纤系统所需要的数据，常采用截断法和插入法，本节介绍这两种方法，背向散射法在后续实验章节介绍。

无论采用哪种测量方法，在接入测量之前都应该对传输的光进行一定的处理，以此来保障测量的结果是在稳定的功率分布条件下得到的。

对于多模光纤，不同的模式分布对损耗有很大影响。不同的发射条件，可产生不同的模式分布，有不同的光纤损耗值，因此在测量时需要特别注意光功率是如何入射到光纤中的。如果入射光斑很小，光束发散角在光纤数值孔径所允许的范围内，则光功率集中到纤芯中心区，更高阶模式的功率损耗对总损耗的作用可以忽略，如图 2-2.4(a)所示。如果入射光斑尺寸大于光纤纤芯直径，光束发散角超过了光纤数值孔径允许的范围，这样入射光束在光纤纤芯和数值孔径所允许的范围之外的部分就损失掉了，此时高阶模式的功率损耗对总损耗的作用就很大，如图 2-2.4(b)所示。因此，只有在稳态模式分布条件下，光纤中传输的对数光功率与光纤长度才是线性关系，才能更加精确地测量光纤损耗。从光注入光纤直到达到稳态模功率分布的距离称为耦合长度。如果光纤质量较好且处于平直状态，耦合长度会需要若干千米。为了缩短光纤的耦合长度，在光纤测量中常采用扰模器促使光纤中模式耦合尽快达到稳态分布，一般包括扰模、滤模和包层模消除功能。

扰模器是基于耦合的原理采用强烈几何扰动的方法，加速多模光纤中各模式达到稳态分布的器件。常用的扰模器结构有两种：一种是弯曲法，将光纤缠绕在圆柱体上，利用圆柱使光纤产生周期性弯曲，圆柱的直径和间距可选；另一种是短光纤组合法，将 3 段光纤组合在一起，其中第一和第三段是阶跃型多模光纤，第二段是梯度多模光纤。

对于单模光纤，由于只传导基模，没有稳态模功率分布问题，在光的注入系统中不需要扰模。

除开背向散射法，截断法和插入法测量损耗的方法具体如下。

1. 截断法

最精确的光纤损耗测量方法是剪断法，也称为两点法，是 CCITT 建议的损耗测量基准测试法，是严格按照损耗定义建立起来的。这种方法需要在接入光纤的两端测量光功率，可以在一个或多个波长上进行测量。如果要测量频谱响应，则需要在一个波段内进行测量。首先在光纤输出端(远端)测量光功率，然后在不改变入射条件的情况下，在离光源几米处将光纤截断，再测量近端输出光功率，如图 2-2.3 所示。

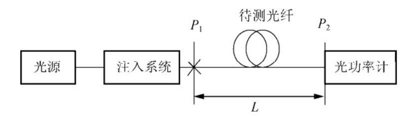


图 2-2.3　剪断法测量光纤损耗的示意图

图 2-2.3 中，先测量长光纤的输出光功率 P_2。保持注入条件不变，剪断长度为 L 的光纤，测量短光纤的输出光功率 P_1。根据式(2.2-3)，可求出损耗系数为

$$\alpha = \frac{10}{L}\lg\frac{P_1}{P_2} \tag{2-2.7}$$

这种方法的优点是准确性高，测量设备简单，但是具有一定的破坏性，每测量一次要截断一段光纤，不适于在施工现场使用，不利于多次重复测量。

2. 插入法

CCITT 建议采用插入损耗法作为损耗测量的替代测试方法之一。在现场测量时，待测光纤是已敷设的成缆光纤，一般放置在管道中，且连接有其他器件，往往不能剪断。插入损耗法虽然没有截断法精确，但是更适合现场条件的测量。插入法测量损耗原理如图 2-2.4 所示。

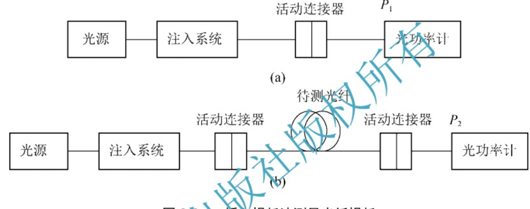


图 2-2.4　插入损耗法测量光纤损耗

光的发射和探测都通过光纤活动连接器连接。光源发出的光通过光的注入系统输入到光纤中，并通过光纤活动连接器与光功率计接通。首先，测量短光纤的输出功率 P_1，然后通过光纤连接器接入被测光纤，测量长光纤的输出功率 P_2。如果忽略连接器损耗，被测光纤的长度为 L，则将这 3 个参量代入式(2-2.7)可以求出光纤的损耗系数，同时也可以求出光纤的总损耗，即为平均损耗系数与光纤长度的乘积。

(三) 光功率测量

光功率是光通信领域的重要参数之一。光纤损耗的测量，实际上也是测量光纤两端的光功率。因此光功率测量是光纤测量中最基本的操作，而光功率计就是测量光功率的仪表。

测量光功率有热学法和光电法。热学法在波长特性、测量精度等方面较好，但响应速度慢，灵敏度低，设备体积大。光电法有较快的响应速度、良好的线性特性而且灵敏度高，测量范围大，但其波长特性和测量精度方面不如热学法。光通信中的光功率较很弱，范围大约从 nW 级到 mW 级。光通信测量中普遍采用光电法制作的光功率计。光电法就是用光电检测器检测光功率，实质上是测量光电检测器在受光辐射后产生的微弱电流，该电流与入射到光敏面上的光功率成正比。因此，此类光功率计实际上是半导体光电传感器与电子电路组成的放大、数据处理单元的组合。电子电路部分一般称为主机，半导体光电传感器称为探头，基本原理方框图如图 2-2.5 所示。典型的数字光功率计由光电检测器、电流/电压(I/V)变换器、放大器及显示器 4 部分组成。光电检测器在受光辐照后，产生微弱的光生电流，该电流与入射到光敏面上的光功率成正比，通过 I/V 变换器后变换成电压信号，再

经过对电压信号的放大和低通滤波、校正以及模/数(A/D)变换等处理后，在显示器上最终显示光功率值的大小。

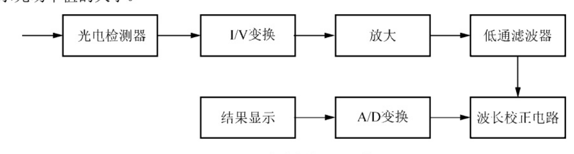


图 2-2.5　光功率计原理示意图

光功率计的主要技术指标有以下几个。

1. 波长范围

它主要由探头的特性所决定，由于不同半导体材料制成的光电二极管对不同波长的光强响应度不同，所以一种探头只能在某一波长范围内适用，而且每种探头都是在其中心响应波长上校准的，为了覆盖较大的波长范围，一台主机往往配备几个不同波长范围的探头。

2. 光功率测量范围

它主要由探头的灵敏度和主机的动态范围所决定。使用不同的探头有不同的光功率测量范围。为了从强背景噪声中提取很弱的信号，以提高灵敏度，主机都设有平均处理功能，为了消除暗电流的影响，主机还具有自动偏差校准。

光功率计种类繁多，功能也不完全相同。一般有通用型号和高灵敏度型。其中高灵敏度型光功率计利用斩波器(通常和功率计的传感器装在一起)将被测光信号调制成一定频率的交流信号，以利于放大器放大，改善信噪比，可使灵敏度比通用型提高 20～30dBm。通常情况使用通用性光功率计即可。

四、实验仪器设备

光功率计　　1310nm LD 光源　　1550nm LD 光源
待测光纤　　光纤跳线

五、实验步骤

(1) 将 1310nm LD 光源打开预热 30 分钟。

(2) 将激光耦合进光纤的起始端，用一定长度的光纤跳线在扰模器上缠绕，达到稳定的模式输出后，在光纤跳线的另一端测量或连接待测光纤。

(3) 将光功率计电源开关拨到“单开”位置。

(4) 光功率计调零。在遮光下进行(盖上光输入保护盖)，按“调零”键即可。

(5) 测量方式的选择。用“波长”键设定波长为 1310nm，使之与被测波长相符。

(6) 按照图 2-2.4(a)，将两端都带有标准 FC/PC 活动接头的光纤跳线的一端直接插入光功率计的光输入插座，另一端插入光源的光输出插座，测出参考光功率 P_1。

(7) 按照图 2-2.4(b)，将待测光纤串到跳线的一端和光功率计输入端之间，测出参考光



通过待测光纤后的功率 P_2。

(8) 测试中可根据用户的习惯和测试特点随时按“W/dBm”键得到线性(W)、对数值(dBm)读数。

(9) 计算出光纤的损耗和损耗系数。

(10) 采用 1550nm LD 光源，用上面同样的步骤测量不同波长下待测光纤的损耗。

六、注意事项

(1) 注意输入光的强度和波长，避免光功率太大而损坏光功率计。

(2) 连接光纤活动连接器时，要先用蘸有酒精的棉花将光输出端面擦干净。

(3) 仪器应避免机械振动、碰撞、跌落及其他机械损伤。

(4) 激光输入光功率计后，等数值稳定后再读数。

(5) 不要挤压、曲折光纤，否则会引起测量结果的偏大。

七、实验数据与分析

将数据填入表 2-2.2 中，计算不同波长下待测光纤的损耗系数，并进行分析比较。

表 2-2.2　实验数据结果

光纤长度 $L=$　　　/km				
波长	P_1/dBm	P_2/dBm	P_1-P_2/dB	α/(dB / km)
1310nm				
1550nm				

八、思考题

(1) 分析实验结果不稳定的原因。

(2) 分析实验结果偏差的原因。

实验 3
光时域反射计测量光纤链路特性

一、实验目的

(1) 了解光时域反射计工作原理及操作方法。

(2) 学习用光时域反射计测量光纤平均损耗、接头损耗、反射损耗、光纤长度和故障点位置。

二、实验内容

(1) 用光时域反射计测量光纤长度。

(2) 用光时域反射计测量光纤损耗特性。

三、实验原理

(一) 背向散射法原理

除了剪断法和插入法测量光纤损耗外，CCITT 还建议了光纤测量的另外一种替代测量方法——背向散射法。背向散射法与光纤损耗测量的另外两种方法相比，有许多优点：其一，这种测量是非破坏性的，适于工程现场的操作；其二，这种方法只需要在光纤的一端进行，便于现场测量长距离光纤；最后，这种方法可以直接测得光纤损耗沿长度的分布，而插入法和剪断法只能测量光纤线路的总损耗。

背向散射法利用了光纤中光脉冲的瑞利散射。由于瑞利散射光功率与传输光功率成比例，利用与传输光相反方向的瑞利散射光功率可以确定光纤损耗系数。在测量时，光源发出一个窄脉冲光信号，通过光纤耦合器注入到光纤中。瑞利散射光中有一部分传输方向与入射光相反，这部分后向散射光通过耦合器进入光电探测器，经过处理得到后向散射测量曲线，典型测量曲线如图 2-3.1 所示。

图 2-3.1 各段分别反映如下特性。

a——由于耦合部件和光纤前端面引起的菲涅尔反射脉冲。

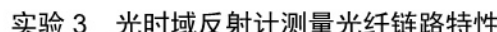
b——光脉冲沿具有均匀损耗的光纤段传播时的背向瑞利散射曲线。

c——由于接头或耦合不完善引起的损耗，或由于光纤存在某些缺陷引起的高损耗区。

d——光纤断裂处，此处损耗峰的大小反映出损坏的程度。

e——光纤末端引起菲涅耳反射脉冲。

除此之外，根据激光器发出激光脉冲与接收到背向散射光之间的时间差可以进行光纤长度的测量。



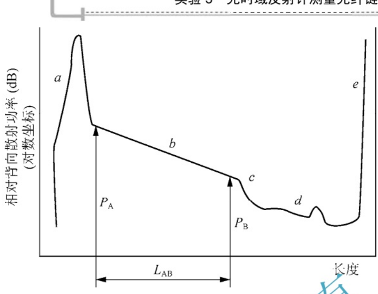


图 2-3.1　背向散射测量的典型记录曲线

背向散射法也存在一些缺点。第一，光源必须使用窄脉冲光源，因此不能用来测量光纤损耗谱；第二，背向散射法不能控制背向散射光的模式分布，会造成两个方向上测量得到的损耗系数不同；最后，这种测量方法对光纤的非均匀性很敏感，测量精度比较低。

(二) 光时域反射计

在实际应用中，背向散射法的实施借助光时域反射计(Optical Time Domain Reflectometer，OTDR)来进行。OTDR 是通过测量背向瑞利散射光，测量光纤损耗、故障点、接头损耗、光纤长度的实用化测量仪器。利用 OTDR 测出的回波曲线，就可以测出光纤的平均损耗、接头损耗、光纤长度和断点位置。OTDR 是光纤通信系统工程现场测量不可缺少的工具。

光时域反射计具有光发射机和光接收机的功能。当光脉冲注入被测光纤以后，此光脉冲遇到光纤连接处、断裂点、缺陷以及断面或尾端时，由于光纤材料中比波长小的不均匀粒子会引起瑞利散射，这种散射光其中很小的一部分能量沿光纤反向传输到输入端并被反射计所接收。光时域反射计通过这种背向散射光可以进行光纤特性的测量。

光时域反射计的结构原理如图 2-3.2 所示。主时钟产生周期为 T 的标准时钟信号。脉冲发生器根据时钟信号的周期产生符合要求的窄脉冲，以便驱动电光 E/O 变换器产生所需宽度的光脉冲。光耦合器将电光 E/O 变换器产生的光脉冲耦合入射到被测光纤中，同时将散射和反射光耦合到光电 O/E 变换器。光电 O/E 变换器将收到的微弱散射光信号和反射光转换成电信号后再由放大器放大，经信号处理后可以得到所需数据，如光纤长度、损耗等。

动态范围、分辨率和测量范围是光时域反射仪的 3 个重要参数。动态范围是指初始后向散射光功率电平与测量 3 分钟之后的噪声电平之差，是以 dB 为单位的光纤损耗的表示方法。背向散射电平初始点是入射光信号的电平值，而噪声电平为背向散射信号，是不可见信号，当信号的信噪比(S/N)小于一定值时，我们将无法准确地分析这些信号的部分或全部特性，所以动态范围越大越好。动态范围意味着 OTDR 能测量的光纤损耗最大值，表征了 OTDR 的测量能力。通常所说的分辨率就是指距离分辨率，指仪器所能分辨的两个相邻

事件点间的最短距离，与脉宽、折射率参数有关。而动态范围与分辨率是相互制约和矛盾的。要获得较高的空间分辨率，脉冲宽度必须尽量小，但是这样会降低信噪比，从而减小动态范围。测量范围指 OTDR 获取数据取样的最大距离，此参数的选择决定了取样分辨率的大小。最佳测量范围为待测光纤长度 1.5～2 倍距离。

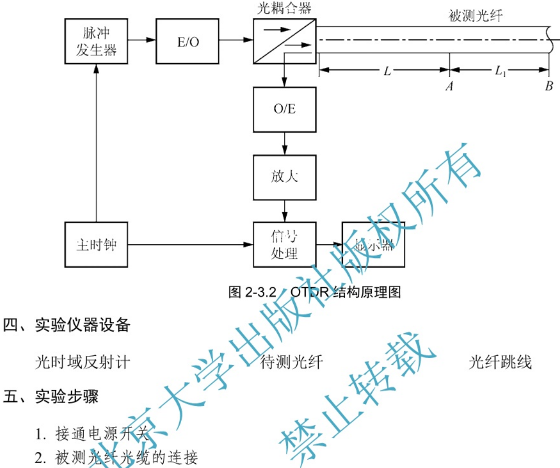


图 2-3.2　OTDR 结构原理图

四、实验仪器设备

光时域反射计　　　　待测光纤　　　　光纤跳线

五、实验步骤

1. 接通电源开关
2. 被测光纤光缆的连接

(1) 将光输出盒盖板向左移动。

(2) 将光纤光缆连接器小心地插入光输出适配器，且适当旋紧。

(3) 将两盘被测光纤通过适配器连接在一起。

3. 波长设定

按 OTDR 仪器面板上右下角的“λ”键，切换工作的激光波长。在 OTDR 屏幕右下角显示的“WL：1550/1310nm SM”，表示当前工作波长为 1550nm。再按 OTDR 仪器面板上右下角的“λ”键，此时在 OTDR 屏幕右下角显示“WL：1310/1550nm SM”，表示当前工作波长为 1310nm。

4. 量程、脉宽的设定

量程：一般选为被测光纤长度的两倍以上，如设置太大，会增加测试时间，并会增加测量误差。按 OTDR 屏幕右侧的“条件”菜单按钮，再按 OTDR 屏幕右侧的“量程”菜单按钮，此时在屏幕下方的“DR：16km”高亮显示，再旋转 OTDR 右上方的旋钮，选择量程为 32km，即在屏幕下方显示“DR：32km”为止。按两次 OTDR 屏幕右侧最下面的菜单按钮，回到主菜单界面。



脉宽：选择原则是宽脉冲发射光功率大，测的距离远，信噪比好，但测距空间分辨率低；而窄脉冲信噪比差，测距空间分辨率高，因此，一般测短距离光纤选窄脉冲，长距离则选宽脉冲。按 OTDR 屏幕右侧的“条件”菜单按钮，再按 OTDR 屏幕右侧的“脉宽”菜单按钮，此时在屏幕下方的“PW：100ns”高亮显示，再旋转 OTDR 右上方的旋钮，选择脉宽为表 2-3.1 中相应的值。按两次 OTDR 屏幕右侧最下面的菜单按钮，回到主菜单界面。

5. 进入预测试状态

按面板上的“START/STOP”键即进入预测方式，此时光插件的激光二极管(LD)将发射光脉冲，CRT 上以对数标度显示由光脉冲引起的菲涅尔反射光、瑞利后向散射光检测后的电信号的波形，且不断刷新。

6. 进入停止状态

按 OTDR 面板上的“START/STOP”键直接进入停止状态。CRT 上显示稳定的波形，此时可以进行结果分析。

波形扩展或压缩：按“H—HIGHT”“H—LOW”键进行水平方向扩展或压缩，按“V—HIGHT”“V—LOW”键进行垂直方向扩展或压缩。

7. 光纤两点间平均损耗的测量

首先按 OTDR 屏幕右侧的“测量”菜单按钮，再按 OTDR 屏幕右侧的“项目选择”菜单按钮，再按 OTDR 屏幕右侧的“平均损耗”菜单按钮，即选中测平均损耗状态。按两次 OTDR 屏幕右侧最下面的菜单按钮，回到主菜单界面。

旋动旋钮，移动“1”字光标时，光标所在的标志点随光标移动到所需位置，按“MARK”键，将光标切换到另一个标志点上，旋动旋钮，移动光标到另一个所需位置。此时 CRT 左下方即显示光纤两点间距离 DIST、损耗及平均损耗，其显示结果如图 2-3.3 所示。

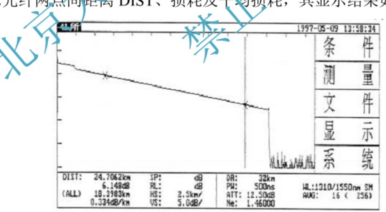
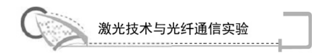


图 2-3.3　测两点平均损耗的结果显示

8. 连接损耗的测量

首先按 OTDR 屏幕右侧的“测量”菜单按钮，再按 OTDR 屏幕右侧的“项目选择”菜单按钮，再按 OTDR 屏幕右侧的“连接损耗”菜单按钮，即选中测连接损耗状态。按两次 OTDR 屏幕右侧最下面的菜单按钮，回到主菜单界面。

在连接损耗状态下，设置 4 个标志点，旋动旋钮，移动光标，把前两标志点置于第一段光纤测试波形线性部分，后两标志点置于第二段光纤测试波形的线性部分，CRT 上即显



示出连接损耗 SP。为避免标志点置入不当，可将垂直标度和水平标度进行适当扩展。其结果显示如图 2-3.4 所示。

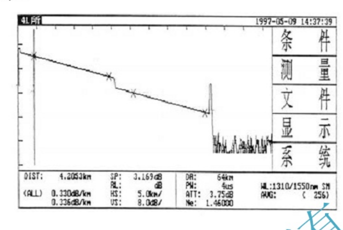


图 2-3.4　测连接损耗结果显示

9. 反射损耗测量

首先按 OTDR 屏幕右侧的“测量”菜单按钮，再按 OTDR 屏幕右侧的“项目选择”菜单按钮，再按 OTDR 屏幕右侧的“反射损耗”菜单按钮，即选中测反射损耗状态。按两次 OTDR 屏幕右侧最下面的菜单按钮，回到主菜单界面。

在波形末端菲涅尔反射峰刚上升的前一点(散射信号处)置一标志点，再在反射峰顶置一标志点，即在 CRT 上显示出反射损耗 RL 值。其结果显示如图 2-3.5 所示。

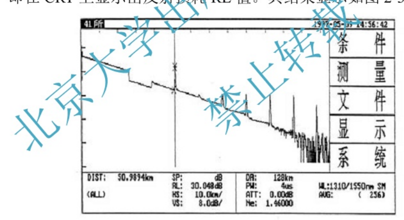


图 2-3.5　测反射损耗结果显示

重复操作步骤 2 到步骤 9，完成表 2-3.1 中所有的内容。

10. 基于以上步骤，进行光纤长度的测量

六、注意事项

(1) 将待测光纤与 OTDR 光插件的光输出适配器相连时，注意光纤所用活动连接器应与光插件和光输出适配器相匹配。

(2) 用无水酒精棉球清洗光连接器的端面，必须确保光连接器无灰尘污染，无任何外部杂物。



(3) 在“START/STOP”键灯亮时，激光器在工作，此时有光脉冲输出，防止光脉冲射入人眼。

(4) 一般测试时，要在仪器的输出口加接一段 0.3～2km 的过渡光纤。

七、实验数据与分析

(1) 测量不同波长、不同脉冲宽度条件下测量连接损耗、平均损耗和反射损耗。将结果记录在表 2-3.1 中。

表 2-3.1　OTDR 测量结果

量程/km	波长/nm	脉冲宽度/ns	平均损耗/(dB/km)	连接损耗/dB	反射损耗/dB
	1310	100ns			
		500ns			
		1μs			
		4μs			
	1550	100ns			
		500ns			
		1μs			
		4μs			

(2) 对实验结果进行分析。

(3) 两段光纤的长度分别为多少？

八、思考题

(1) 实验中为什么要在 OTDR 的输出口加接一段 0.3～2km 的过渡光纤？

(2) 不同波长、不同脉冲宽度条件下测量的连接损耗、平均损耗和反射损耗有什么变化？

(3) 为什么选择测试量程不能小于被测光纤的两倍？

实验 4
单模光纤的色散测量

一、实验目的

(1) 理解色散的概念。
(2) 了解色散的机制。
(3) 了解并掌握相移法测量光纤色散的原理和方法。

二、实验内容

用相移法测量光纤色散。

三、实验原理

(一) 色散机制

色散是在光纤中传输的光信号，由于不同频率成分和模式成分的光的时间延迟不同而产生的一种物理效应。这种时延差会导致光脉冲沿着光纤传播时发生展宽，而脉冲展宽的最终结果是相邻脉冲的相互重叠。当交叠达到一定程度后，在接收端无法将相邻脉冲区分开，就会发生误码。因此，色散特性限制了光纤的信息容量。

色散包括模间色散和模内色散。光纤中不同模式由于传输速度不同造成时延不同，引起光脉冲展宽，称为模间色散，也称为模式色散。同一模式由于光源有一定的线宽，不同波长的传输速率不同将导致光脉冲展宽，这称为模内色散。

在多模光纤中，存在模间色散和模内色散，而前者远大于后者，因此在多模光纤中常只考虑模间色散对传输容量的影响。

在单模光纤中，由于只存在基模，消除了模间色散，只存在模内色散。模内色散与光源的线宽密切相关，也称为波长色散或色度色散，包括了材料色散和波导色散两种机制。材料色散是由于光纤纤芯的折射率随波长而改变，模式内部不同波长成分的光时间延迟不同产生的。波导色散是由于波导结构参数与波长有关而产生的，波导的传输常数会随波长变化而改变，从而导致色散。

1. 模间色散

多模光纤的色散较大，通常可以采用时域光脉冲信号的展宽来描述。

对于阶跃型多模光纤，可以简单地通过考查最短和最长的光线路径来估算脉冲的展宽程度，如图 2-1.3 所示，最短和最长光线之间的时间延迟为



$$\Delta T_{\text{mod}} = \frac{(L/\sin\phi_c) - L}{c/n_1} = \frac{Ln_1}{c} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_2} = \frac{Ln_1\Delta}{c} \tag{2-4.1}$$

ΔT_{mod} 可以等效为光纤输入端输入一个冲击响应脉冲后在输出端得到的脉冲展宽，即为模间色散。

对于渐变型多模光纤，当折射率分布指数 $\alpha = 2(1-\Delta)$ 时，可以估算得到脉冲展宽，具体为

$$\Delta T_{\text{mod}} = \frac{Ln_1\Delta^2}{8c} \tag{2-4.2}$$

2. 模内色散

在单模光纤中，采用时延差来表示色散。

假设频率为 ω 的光波在长度为 L 的单模光纤中传输，它在传输过程中的速度可用群速度 v_g 表示。所谓群速度是指光能在光纤中的传输速率，即

$$v_{\text{g}}^{-1} = \text{d}\beta/\text{d}\omega \tag{2-4.3}$$

式中：β 为传播常数。利用传播常数 $\beta = \bar{n}k_0 = \bar{n}\omega/c$，可以得到

$$v_{\text{g}} = c/n_{\text{g}} \tag{2-4.4}$$

式中：n_{g} 为群折射率，定义为

$$n_{\text{g}} = \bar{n} + \omega \cdot \frac{\text{d}\bar{n}}{\text{d}\omega} \tag{2-4.5}$$

光波在传输过程中所需要的时间称为时延，即

$$T = L/v_{\text{g}} \tag{2-4.6}$$

基模的群速度与光波长有关，光信号的不同波长分量将具有不同的群速度，因而到达光纤输出端所需的时延将会不同，结果导致光脉冲展宽，所以这种色散又称为群速度色散。假设光脉冲的带宽为 $\Delta\omega$，则光脉冲的展宽即色散可用不同频率成分间的时延差来表示，$\Delta\omega$ 带宽上引起的时延差为

$$\Delta T = \frac{\text{d}T}{\text{d}\omega}\Delta\omega = L\beta_2\Delta\omega \tag{2-4.7}$$

式中，$\beta_2 = d^2\beta/\text{d}\omega^2$ 称为群速度色散，决定了光脉冲在光纤中的展宽程度。时延差越大，色散越严重。

式(2-4.7)也可以用光脉冲的波长范围即光源的线宽 $\Delta\lambda$ 来表示，即

$$\Delta T = \frac{\text{d}}{\text{d}\lambda}(L/v_{\text{g}})\Delta\lambda = LD\Delta\lambda \tag{2-4.8}$$

式中：D 为单模光纤的色散系数，单位为 ps/(nm·km)，表示为

$$D = \frac{\text{d}}{\text{d}\lambda}(1/v_{\text{g}}) = \beta_2 \cdot (-2\pi c/\lambda^2) \tag{2-4.9}$$

模内色散包括了材料色散和波导色散，因此色散系数可以写为

$$D = D_{\text{M}} + D_{\text{W}} \tag{2-4.10}$$

式中：D_{M} 和 D_{W} 分别代表材料色散和波导色散，表达式分别为

$$D_{\mathrm{M}}=\frac{1}{c}\frac{\mathrm{d}n_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}\lambda}=-\frac{2\pi}{\lambda^2}\frac{\mathrm{d}n_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}\omega}=-\frac{2\pi}{\lambda^2}\left(2\frac{\mathrm{d}\bar{n}}{\mathrm{d}\omega}+\omega\frac{\mathrm{d}^2\bar{n}}{\mathrm{d}\omega^2}\right) \tag{2-4.11}$$

$$D_{\mathrm{W}}=-\frac{2\pi\Delta}{\lambda^2}\left[\frac{n_{2\mathrm{g}}^2}{n_2\omega}\frac{V\mathrm{d}^2(Vb)}{\mathrm{d}V^2}+\frac{\mathrm{d}n_{2\mathrm{g}}}{\mathrm{d}\omega}\frac{\mathrm{d}(Vb)}{\mathrm{d}V}\right] \tag{2-4.12}$$

式中：$n_{2\mathrm{g}}$ 为包层材料的群折射率。

3. 材料色散

由于光纤材料的折射率随波长变化，而光源有一定谱宽，因此不同波长会引起不同的群速度，群速度随波长而变的色散称为材料色散。色散大小取决于光纤材料折射率的波长特性和光源的谱宽。由式(2-4.11)可知，材料色散由 $n_{\mathrm{g}}-\lambda$ 曲线的斜率决定。当 $\lambda=1.276\mu\mathrm{m}$ 时，$\mathrm{d}n_{\mathrm{g}}/\mathrm{d}\lambda=0$，$D_{\mathrm{M}}=0$，该波长称为零色散波长 λ_0。材料色散在 $\lambda<\lambda_0$ 时为负值，在 $\lambda>\lambda_0$ 时为正值。

4. 波导色散

波导色散与光纤波导效应有关，取决于波导尺寸以及纤芯与包层的相对折射率差。单模光纤中，携带信息的光脉冲在纤芯和包层间分布，主要部分在纤芯中传输，剩余部分在包层中传播。纤芯和包层拥有不同折射率，两个部分以不同的速度传播。光被限制在一个拥有不同折射率的结构——纤芯和包层的组合中传播，脉冲会扩展。因此，即使光纤材料没有色散特性，波导色散也会发生。波导色散仅因为将光限制在一个特定的结构中而产生。

当材料色散和波导色散共同作用时，波导色散将零色散波长 λ_0 向长波长方向移动了30～40nm，因而总的零色散波长为1.31μm 。同时，波导色散在 1.3～1.6μm 波长范围内使总色散减小，在 1.55μm 波长附近，光纤的 D 的典型值为 15～18ps/(km・nm)。

(二) 色散的测量

测量色散系数的方法有频域法、时域法等。当光源的调制信号为正弦波时，测量不同波长时正弦信号经光纤传输后的相移，这种方法称为频域法或相移法。当光源调制信号为脉冲波时，测量不同波长的脉冲信号的相对时延，称为时域法或者脉冲法。其中，最常用的方法是相移法，它是测量单模光纤色散的基准方法。

根据式(2-4.9)，可知色散系数表示了单位长度光纤、单位光源频谱宽度的脉冲展宽，可用式(2-4.13)表示：

$$D=\frac{1}{L}g\frac{\mathrm{d}\tau(\lambda)}{\mathrm{d}\lambda}=\frac{1}{L}g\frac{\Delta\tau(\lambda)}{\Delta\lambda} \tag{2-4.13}$$

假设光源的调制频率为 f_{c}，可用相移来表示时延差，即

$$\Delta\tau(\lambda)=\frac{\Delta\phi(\lambda)}{2\pi f_{\mathrm{c}}} \tag{2-4.14}$$

则式(2-4.13)可写为

$$D=\frac{1}{2\pi f_{\mathrm{c}}L}g\frac{\Delta\phi(\lambda)}{\Delta\lambda} \tag{2-4.15}$$

由此，可以利用测量相移来计算出单模光纤的色散系数。测量原理如图 2-4.1 所示。



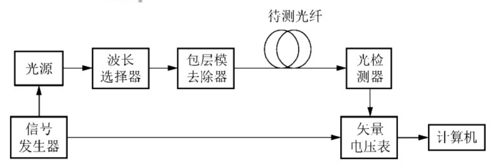


图 2-4.1　相移法测量单模光纤色散原理图

在本实验中，测量方法基于上述相移法，实验结构原理图如图 2-4.2 所示。

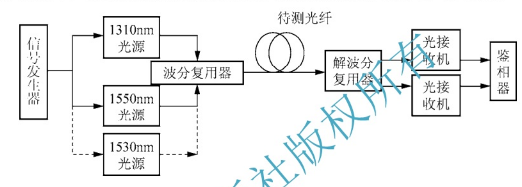


图 2-4.2　相移法测量单模光纤色散实验结构原理图

如图 2-4.2 所示，将 1550nm 信号光和 1310nm 信号光经待测光纤后测得相位差为 $2N\pi+\phi_1$，其中 $0<\phi_1<2\pi$。再将 1530nm 信号光和 1310nm 信号光经待测光纤后测得相位差为 $2N\pi+\phi_2$，其中 $0<\phi_2<2\pi$。于是可以得到 1530nm 和 1550nm 信号光经过待测光纤后的相位差为 $\phi_1-\phi_2$，将相位差代入式(2-4.15)中，可求得色散系数 D。

四、实验仪器设备

1550nm 半导体激光光源　　1310nm 半导体激光光源　　信号发生器

1310nm/1550nm 波分复用器光接收机　　待测光纤　　鉴相器

五、实验步骤

(1) 选择 1310 nm 和 1550 nm 光源，按照图 2-4.2 连接实验设备。

(2) 接通电源，选择信号发生器频率，记录鉴相器的读数，即为 1310nm/1550nm 的相位差 ϕ_1。

(3) 选择 1310nm 和 1530nm 光源，按照图 2-4.2 连接实验设备，重复步骤(2)，记录鉴相器的读数，即为 1310nm/1530nm 的相位差 ϕ_2。

(4) 利用公式计算待测光纤色散值。

六、实验数据与分析

将记录的数据填入表 2-4.1，并计算色散系数 D。

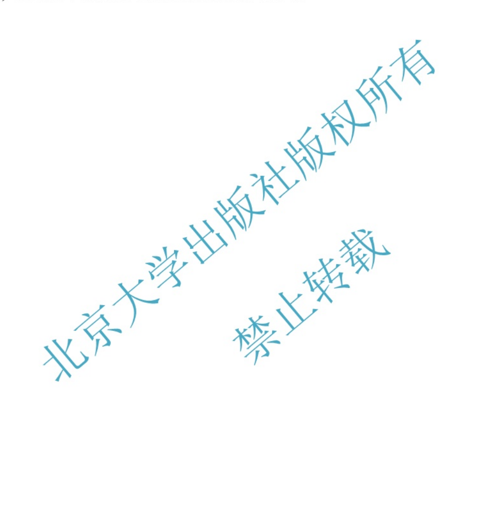
表 2-4.1 相移法测量色散数据记录表

ϕ_1	ϕ_2	$\phi_1-\phi_2$	D

七、思考题

(1) 色散会对通信造成什么影响？

(2) 信号频率的选择对实验的测量是否有影响？



实验 5

光无源器件性能参数的测试

一、实验目的

(1) 了解光耦合器、光衰减器、光环行器和光隔离器等无源器件的工作原理。

(2) 掌握光耦合器、光衰减器、光环行器和光隔离器等无源器件的使用方法。

(3) 掌握测试光耦合器、光衰减器、光环行器和光隔离器等无源器件的特性参数的方法。

二、实验内容



(1) 测量光隔离器的插入损耗和隔离度等参数。

(2) 测量光耦合器的插入损耗、附加损耗和耦合比等参数。

(3) 测量光衰减器的插入损耗和衰减范围等参数。



(4) 测量光环行器的插入损耗、隔离度、方向性和回波损耗等参数。

三、实验原理

(一) 光耦合器

光耦合器能够把一个输入光信号分配给多个输出，或把多个输入的光信号组合成一个输出。一般是对同一波长的光功率进行分路或合路，因此又称为分路器或合路器。对不同波长信号的合路和分路通常由波分复用/解复用器实现，可以将其看成是一种特殊的光耦合器。

1. 光耦合器的拓扑结构

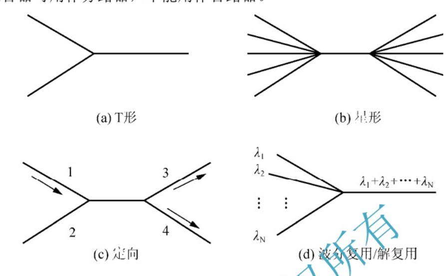
光耦合器的典型拓扑结构一般有 4 种，分别是 T 形、星形、定向耦合器和波分复用/解复用器，分别如图 2-5.1(a)、(b)、(c)和(d)所示。

T 形耦合器是一种 1×2 的三端耦合器。它把一根光纤输入的光信号按一定比例分配给两根光纤，或把两根光纤输入的光信号组合在一起，输入一根光纤。用作不同分路比的功率分配器或功率组合器。

星形耦合器 $n\times m$ 耦合器，把 n 根光纤输入的光功率组合在一起，均匀地分配给 m 根光纤。m 和 n 不一定相等，常用作多端功率分配器。

定向耦合器是 2×2 的 3 端口或 4 端口耦合器，能分别取出光纤中向不同方向传输的光信号。例如：光信号从端 1 传输到端 3，一部分由端 4 输出，端 2 无输出；光信号从端

3 传输到端 1，一部分由端 2 输出，端 4 无输出。输出端的光功率不一定是平均分配的。这种定向耦合器可用作分路器，不能用作合路器。



(a) T形　(b) 星形　(c) 定向　(d) 波分复用/解复用

图 2-5.1　光耦合器的拓扑结构

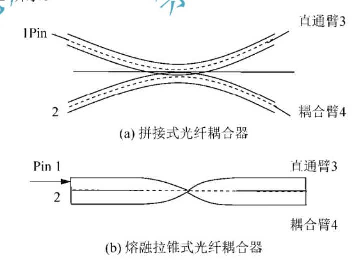
波分复用/解复用器是一种与波长有关的耦合器，波分复用器的功能是把多个不同波长的光信号组合在一起，也称为合波器；而解复用器则把组合在一起的多个不同波长的光信号进行分解，也称为分波器。

2. 光耦合器的材料结构

光耦合器按照材料结构的不同则可以分为光纤型、微光元件型和波导型等。

1) 光纤型耦合器

光纤型耦合器是基于光纤这种材料结构制作的光耦合器，是最常见的一种光耦合器。多模和单模光纤都可以制作成耦合器。通常有两种结构型式：一种是拼接式，一种是熔融拉锥式，如图 2-5.2 所示。



(a) 拼接式光纤耦合器

(b) 熔融拉锥式光纤耦合器

图 2-5.2　光纤耦合器的制作

拼接式光纤耦合器是将光纤埋入玻璃块中的弧形槽中，在光纤侧面进行研磨抛光，然后将经研磨的两根光纤拼接在一起，靠透过纤芯–包层界面的消逝场产生耦合。

熔融拉锥式光纤耦合器则将两根或多根光纤扭绞在一起，用微火炬对准耦合部分加热，在熔融过程中拉伸光纤，形成双锥形耦合区。在双锥形区，各光纤的包层合并成同一包层，纤芯变细靠近，靠近的程度决定了耦合的大小。

本节以 2×2 的光纤耦合器为例，分析其耦合过程，如图 2-5.3 所示。在下行渐细区，输入模式的模场直径变得越来越大；耦合区内，两个纤芯非常靠近，一个纤芯的光耦合到另一个纤芯，耦合过程逐渐发生；在上行渐细区，光纤直径增大，模式越来越被限制在纤芯内，最终变为两个分离模式分别进入两根光纤输出。在耦合区内，耦合机理基于光纤的消逝场耦合的模式理论。

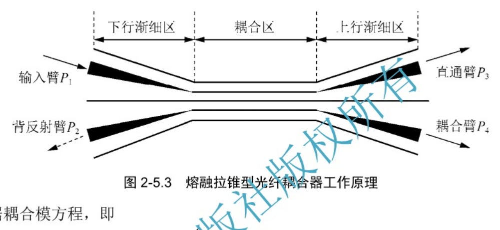


图 2-5.3　熔融拉锥型光纤耦合器工作原理

根据耦合模方程，即

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}P_3}{\mathrm{d}z} = -j\beta P_3 + CP_4 \\ \dfrac{\mathrm{d}P_4}{\mathrm{d}z} = -j\beta P_4 + CP_3 \end{cases} \tag{2-5.1}$$

式中：P_3 为直通臂中的传输功率；P_4 为耦合臂中的功率；β 为传输常数；C 为取决于光纤参数和光波长的耦合系数。可以得到直通臂和耦合臂的输出光功率为

$$\begin{cases} P_3 = P_1 \cos^2(Cz) \\ P_4 = P_1 \sin^2(Cz) \end{cases} \tag{2-5.2}$$

式中：P_1 为总输入功率。从式(2-5.2)可见，耦合臂的相位比直通臂的相位落后了 $\pi/2$。耦合区内两纤芯光功率随耦合区长度的耦合交换规律如图 2-5.4 所示。耦合区两纤芯中光功率随耦合区长度进行耦合交换，可根据耦合比要求决定拉伸长度。同时也可以看到，两臂的输出功率分配比随着耦合区长度的增加周期性重复，但需要注意的是，如果拉锥长度太长，纤芯变得过细后，将引起能量辐射，功率降低，附加损耗明显增加。

2) 微光元件型光耦合器

微光元件型耦合器通常采用自聚焦透镜、分光片、滤光片或光栅等微光元件构成 T 形耦合器、定向耦合器和波分复用/解复用器等。例如，采用两个 1/4 焦距的渐变折射率圆柱形透镜(GRIN)，中间夹有分光片(可以让部分光透射，部分光反射)，可以构成一个 T 形耦合器。输入光束从光纤 1 投射到第一个 GRIN 透镜，部分光被分光片反射回来耦合进入光纤 2，而透射光则被第二个 GRIN 透镜耦合进光纤 3，如图 2-5.5 所示。

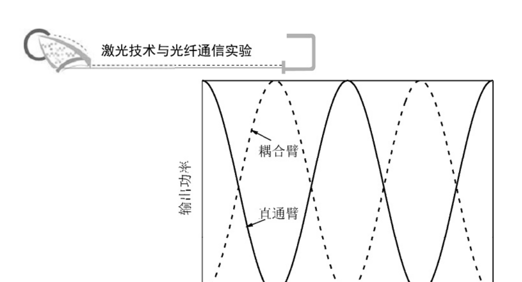


图 2-5.4 输出功率与耦合区长度的关系曲线

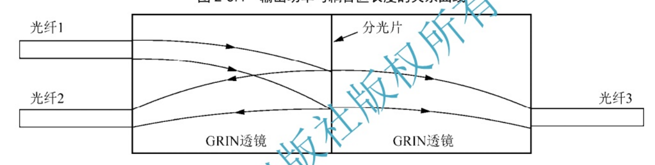


图 2-5.5 微光元件型耦合器

3) 波导型光耦合器

采用平面光波导技术也能制作不同结构和功能的光耦合器。通常在一片平板衬底上制作所需形状的光波导，衬底作支撑体，又作波导包层，波导材料可以根据器件的功能来选择。

对于制作以上 3 种材料结构的低端口数的光耦合器，通常采用直接法制作。当光耦合器端口数目较多时，一般采用基本单元拼接法，这种方法比较简单和常用。比如，4 个采用直接法制作的 2×2 耦合器可以构成 4×4 的星形耦合器，12 个 2×2 耦合器可以构成 8×8 光耦合器，还可将 1×2 或 2×2 耦合器逐次级联构成 1×N 或 2×N 耦合器。

3. 性能参数

这里主要介绍光纤耦合器的性能参数，表征其性能的主要参数有插入损耗、附加损耗、分光比与隔离度或串音。

1) 插入损耗

插入损耗 L_i 指穿过耦合器的某一光通道所引入的功率损耗，通常以某一特定端口的输出功率 P_o 与某一输入端口的输入功率 P_i 之比的对数表示，即

$$L_i = -10\lg\frac{P_o}{P_i}[\text{dB}] \tag{2-5.3}$$

例如，对于图 2-5.3 所示的 2×2 耦合器，假设 1 端为输入端，3、4 端为输出端，则 3 端口的插入损耗为



$$L_{1-3}=10\lg\frac{P_1}{P_3}\left[\text{dB}\right] \tag{2-5.4}$$

2) 附加损耗

附加损耗 L_e 指由散射、吸收和器件缺陷产生的损耗，是全部输入端的光功率总和 P_{it} 和全部输出端的光功率总和 P_{ot} 的比值，用分贝表示

$$L_e=10\lg\frac{P_{it}}{p_{ot}}[\text{dB}] \tag{2-5.5}$$

同样对于前述的 2×2 四端口光纤耦合器，L_e 可以表示为

$$L_e=10\lg\frac{P_1}{P_3+P_4}\left[\text{dB}\right] \tag{2-5.6}$$

3) 串音

串音 L_c 是指一个输入端的光信号被耦合器反射或散射到其他端的光功率 P_r 与输入光功率 P_i 的比值的对数，而起比值的倒数的对数称为隔离度或方向性。串音可表示为

$$L_c=10\lg\frac{P_r}{P_i}[\text{dB}] \tag{2-5.7}$$

对于前述的 2×2 四端口光纤耦合器，串音可表示为

$$L_c=10\lg\frac{P_2}{P_1}[\text{dB}] \tag{2-5.8}$$

4) 分光比或耦合比

分光比或耦合比 S_R 指某一输出端口光功率 P_o 与全部输出端口功率之和即总输出功率 P_{ot} 之比，具体为

$$S_R=10\lg\frac{P_o}{P_{ot}}[\text{dB}] \tag{2-5.9}$$

对于前述的 2×2 四端口光纤耦合器，分光比可表示为

$$S_R=10\lg\frac{P_j}{P_3+P_4}\left[\text{dB}\right],\quad j=3\text{或}4 \tag{2-5.10}$$

(二) 光衰减器

光衰减器是一种用来降低光功率的光无源器件。根据不同的应用，它分为可调光衰减器和固定光衰减器两种。在光纤通信中，可调光衰减器主要用于调节光线路电平，在测量光接收机灵敏度时，需要用可调光衰减器进行连续调节来观察光接收机的误码率；在校正光能量指示仪和评价光传输设备时，也要用可调光衰减器。固定光衰减器结构比较简单，如果光纤通信线路上电平太高就需要串入固定光衰减器。光衰减器不仅在光纤通信中有重要应用，而且在光学测量、光计算和光信息处理中也都是不可缺少的光无源器件。

可调光衰减器一般采用光衰减片旋转式结构，衰减片的不同区域对应金属膜的不同厚度。根据金属膜厚度的不同分布，可做成连续可调式和步进可调式。为了扩大光衰减的可调范围和精度，采用衰减片组合的方式，将连续可调的衰减片和步进可调衰减片组合使用。

对于固定式光衰减器，在光纤端面按要求镀上有一定厚度的金属膜即可以实现光的衰

耗；也可以用空气衰耗式，即在光的通路上设置一个几微米的气隙，即可实现光的固定衰耗。

可调光衰减器的主要技术指标包括插入损耗、衰减范围和衰减精度等。

1. 插入损耗

插入损耗指当光衰减器的衰减量为零时，光信号经过光衰减器后产生的功率损耗，通常用输出光功率相对输入光功率的比率(以 dB 为单位)表示。假设光隔离器的正向输入光功率为 P_1，输出光功率为 P_2，则其计算公式为

$$\text{Insertloss} = 10\lg\frac{P_1(\text{mW})}{P_2(\text{mW})} = P_1(\text{dBm}) - P_2(\text{dBm}) \tag{2.5-11}$$

2. 衰减范围

衰减范围是指可调光衰减器的衰减量调节范围，即最大衰减量和最小衰减量之差。

3. 衰减精度

衰减精度是指可调光衰减器的衰减量的最小可调谐精度。

（三）光隔离器

光隔离器只允许光正向传输，阻止光往其他方向特别是反方向传输。通常放在激光器或者放大器的后面，以避免反射光返回而危害激光器或放大器的稳定工作。

光隔离器是利用了磁光晶体的法拉第效应，一般由偏振控制器和法拉第旋转器构成。其中，法拉第旋转器是光隔离器的核心装置，由一块光透明材料和周围的磁铁组成。磁场作用于光传播方向，当偏振光经过法拉第旋转器时会发生偏振平面的旋转。而旋转角度与磁场强度和作用区长度等有关。

光隔离器按照偏振特性来分，有偏振相关型和偏振无关型。它们的原理图分别如图 2-5.6 和图 2-5.7 所示。

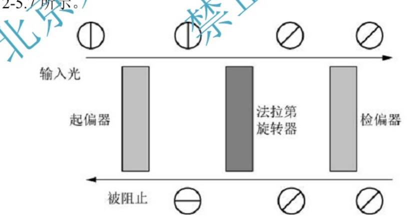


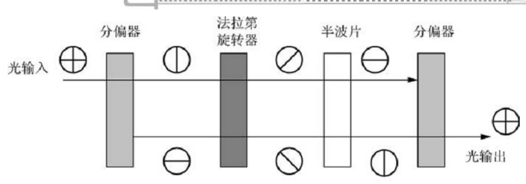
图 2-5.6　偏振相关光隔离器原理图

对于偏振相关光隔离器，光通过法拉第旋转器时，在磁场作用下，光偏振方向旋转角为

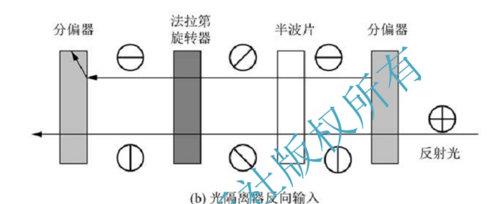
$$\phi = FHL \tag{2-5.12}$$

式中：H 为磁场强度；L 为法拉第材料长度；F 为材料的贾尔德系数。





(a) 光隔离器正向输入



(b) 光隔离器反向输入

图 2-5.7　偏振无关光隔离器原理图

当输入光通过垂直偏振起偏器后，成为垂直偏振光，经过法拉第旋转器旋转了 45°，而检偏器偏振方向和起偏器偏振方向成 45°角，使得光线顺利通过，而反射回来的偏振光经过检偏器、法拉第旋转器以后，继续沿同一方向旋转 45°，即偏振方向刚好与起偏器偏振方向垂直，则光无法反向通过。由于只有垂直偏振的光能通过光隔离器，因此称为偏振相关光隔离器。

偏振无关光隔离器如图 2-5.7 所示，图 2-5.7(a)为光隔离器正向输入。当包含两个正交偏振的输入光波通过空间分离偏振器(SWP)，被分解为两个正交偏振分量，垂直分量直线通过，水平分量偏折通过。两个分量通过法拉第旋转器，偏振态顺时针旋转 45°。半波片将从左向右传播的光的偏振态顺时针旋转 45°。于是，垂直偏振光变为平行偏振光，平行偏振光变为垂直偏振光，经过空间分离偏振器(SWP)合为一束光输出。图 2-5.7(b)是反向输入光的偏振态在隔离器中的演化过程。反射光先通过空间分离偏振器(SWP)，被分解为两个正交偏振分量，垂直分量直线通过，水平分量偏折通过。在反方向上传输时，半波片将从右向左传播的光的偏振态逆时针旋转 45°。两个分量通过法拉第旋转器，偏振态顺时针旋转 45°。在输入端，水平分量偏折通过，垂直分量直线通过，不能被空间分离偏振器再组合在一起，起到隔离作用。

插入损耗和隔离度是光隔离器的两个主要技术指标，插入损耗越小越好，而隔离度越大越好。

光隔离器的插入损耗是指光隔离器正向接入时，输出光功率相对输入光功率的比率(以 dB 为单位)。假设光隔离器的正向输入光功率为 $P_{1正}$，输出光功率为 $P_{2正}$，则其计算公式为

$$\text{Insertloss} = 10\lg\frac{P_{1正}(\text{mW})}{P_{2正}(\text{mW})} = P_{1正}(\text{dBm}) - P_{2正}(\text{dBm}) \tag{2-5.13}$$

隔离度是光隔离器最重要的指标之一，它表征光隔离器对反向传输光的隔离能力。将光隔离器反向接入，假设光隔离器反向输入光功率为$P_{1反}$，输出光功率为$P_{2反}$。则光隔离器隔离度计算公式为

$$\text{Isolator} = 10\lg\frac{P_{1反}(\text{mW})}{P_{2反}(\text{mW})} = P_{1反}(\text{dBm}) - P_{2反}(\text{dBm}) \tag{2-5.14}$$

(四) 光环行器

光环行器是一种多端口输入输出的非互易器件，具有正向顺序导通而反向传输阻止的特性，可以完成正反向传输光的分离，在双向长途干线通信、密集波分复用器及光时域反射计(OTDR)中有广泛的应用。

光环行器的工作原理与隔离器类似，只是端口比隔离器多。典型的光环行器一般有 3 个或 4 个端口。在三端口的光环行器中，在端口 1 输入的光信号只有在端口 2 输出；在端口 2 输入的光信号只有在端口 3 输出，而在端口 3 输入的光信号只能在端口 1 输出。但是在许多应用中，这最后一种状态是不必要的，因此，大多数商用环行器都被设计成“非理想”状态，即吸收从端口 3 输入的任何信号。三端口光环行器的原理图如图 2-5.8(a)所示。

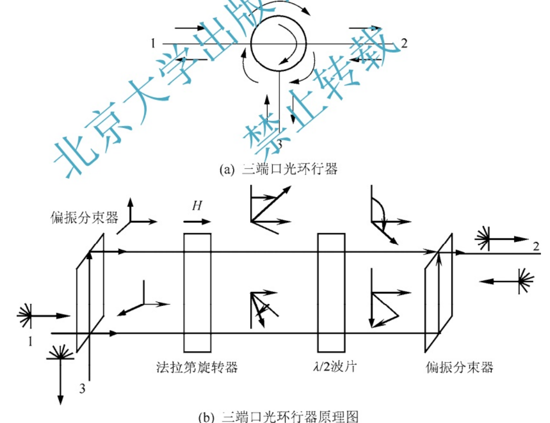


图 2-5.8　三端口光环行器

如图 2-5.8(b)所示，光环行器主要由法拉第旋转器、$\lambda/2$ 波片和偏振分束器组成。当



包含两个正交偏振的输入光波由 1 端输入，被第一个偏振分束器分离成偏振方向平行和垂直的两束光，水平偏振光经偏振分束器和反射镜两次反射，再经过法拉第旋转器，偏振方向旋转 45°，通过 $\lambda/2$ 波片，再次旋转 45°，变为垂直偏振光。而垂直偏振光透过偏振分束器后，经过法拉第旋转器和 $\lambda/2$ 波片旋转 90°，变为平行偏振光，两束偏振光通过偏振分束器再合成为一束光。由于法拉第旋转器对光的旋转方向与入射光的入射方向无关，当反向传输时，即从 2 端输入时，由偏振分束器从 3 端输出，而不能从 1 端输出，因此，当光线由 2 端输入时，只能从 3 端输出。

光环行器的特性参数包括插入损耗、隔离度、方向性和回波损耗等。

光环行器插入损耗就是指光信号经过光环行器后，输出光功率与输入光功率的比值(以 dB 为单位)，如设端口 i 的输入光功率为 $P_{\mathrm{i}}(\mathrm{mW})$，端口 j 的输出光功率为 $P_{\mathrm{j}}(\mathrm{mW})$，则计算光环行器端口 i 到端口 j 的插入损耗的公式为

$$\mathrm{Insertloss}_{\mathrm{i\text{-}j}}=10\lg\frac{P_{\mathrm{i}}(\mathrm{mW})}{P_{\mathrm{j}}(\mathrm{mW})}=P_{\mathrm{i}}(\mathrm{dBm})-P_{\mathrm{j}}(\mathrm{dBm}) \tag{2-5.15}$$

隔离度是光环行器的一个重要指标，它表征了光环行器对反向传输光的隔离能力。测量时需要将光环行器进行反置。光环行器的隔离度定义为

$$\mathrm{Isolation}_{\mathrm{i\text{-}j}}=10\lg\frac{P_{\mathrm{j反}}(\mathrm{mW})}{P_{\mathrm{i反}}(\mathrm{mW})}=P_{\mathrm{j反}}(\mathrm{dBm})-P_{\mathrm{i反}}(\mathrm{dBm}) \tag{2-5.16}$$

方向性是光环行器另一个重要技术指标，它是衡量光环行器的定向传输特性的参数。假设对三端口光环行器，1 端输入功率为 P_1，3 端输出功率为 P_3。则计算光环行器 1 至 2 端方向性计算公式为

$$\mathrm{Directivity}_{1-2}=10\lg\frac{P_1(\mathrm{mW})}{P_3(\mathrm{mW})} \tag{2-5.17}$$

回波损耗又称为后向反射损耗。它是指光纤连接处，光环行器的后向反射光相对输入光的比(以 dB 为单位)。如果光环行器 1 端输入光功率为 P_1，反射光功率为 P_{r}，则计算光环行器 1 端回波损耗的公式为

$$\mathrm{Returnloss}=10\lg\frac{P_1(\mathrm{mW})}{P_{\mathrm{r}}(\mathrm{mW})} \tag{2-5.18}$$

四、实验仪器设备

1310nm 单模光源	1550nm 单模光源	光隔离器
光耦合器	光环行器	光衰减器
光功率计	光纤跳线	折射率匹配液

五、实验步骤

(一) 光隔离器特性测试

1. 测量插入损耗

(1) 实验原理图如图 2-5.9 所示。将光源接入光功率计，测出 1 端的输入光功率。

(2) 按照图 2-5.9 所示，将光隔离器接入光源与光功率计中间，测出 2 端的输出功率。

(3) 根据定义计算光隔离器的插入损耗。

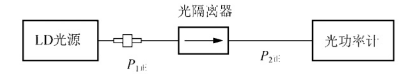


图 2-5.9 光隔离器插入损耗测量原理图

2. 测量隔离度

测量原理如图 2-5.10 所示，步骤与上面类似，只是将光隔离器反向放置，同样测出两端的光功率，并根据定义计算光隔离器的隔离度。

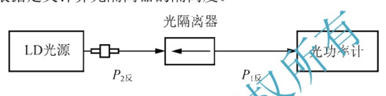


图 2-5.10 光隔离器隔离度测量原理图

(二) 光耦合器特性测试

(1) 按照如图 2-5.11 所示的测量原理图连接实验设备。

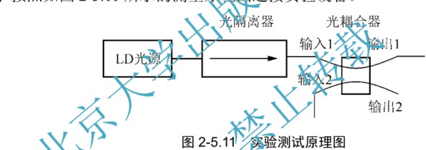


图 2-5.11 实验测试原理图

(2) 根据光耦合器的性能参数的定义，测量 2×2 光纤耦合器的各端口的光功率，代入公式计算光耦合器的性能参数。

(三) 光衰减器特性测试

(1) 按照如图 2-5.12 所示的测量原理图连接实验设备。

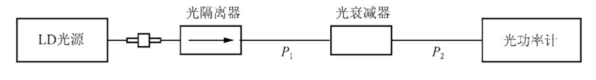


图 2-5.12 光衰减器测量原理图

(2) 将可调光衰减器的衰减量调制最小，测量输入光功率和最大输出光功率，计算光衰减器插入损耗。

(3) 将可调光衰减器的衰减量逐渐增大，测出最小输出光功率，计算光衰减器的衰减范围。



(四) 光环行器特性测试

1. 测量插入损耗

(1) 按照图 2-5.13，LD 光源经光隔离器连接到光功率计，从光功率计中读出输入光功率。

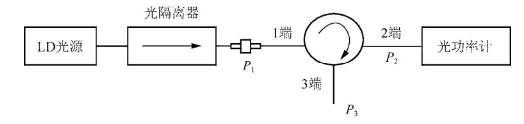


图 2-5.13　光环行器 1 至 2 端插入损耗测量原理图

(2) 在光隔离器和光功率器之间插入光环行器，即光从 1 端输入，然后用光功率计测量环行器 2 端的输出光功率。

(3) 由环行器插入损耗公式(2-5.15)可以计算得出光环行器 1 至 2 端插入损耗。

(4) 利用同样的原理，可以测试光环行器 2 至 3 端的插入损耗。

2. 测量隔离度

(1) 将图 2-5.13 中的光环行器反向接入，LD 光源经光隔离器连接到光功率计，从光功率计中读出输入光功率。

(2) 在光隔离器和光功率器之间反向插入光环行器，即光从 2 端输入，然后用光功率计测量环行器 1 端的输出光功率。

(3) 代入公式(2-5.16)计算得出光环行器 1 至 2 端隔离度。

(4) 同样的原理可以得到光环行器 2 至 3 端隔离度。

3. 测量方向性

(1) 实验原理图如图 2-5.14 所示。图中 2 端末端加折射率匹配液是为了减小从 1 端到 2 端光功率的反射，以保证测量的准确性。

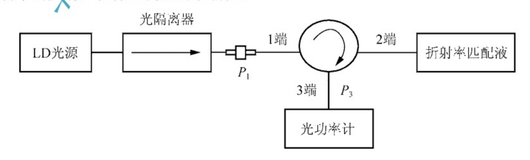


图 2-5.14　光环行器 1 至 2 端方向性测量原理图

(2) 将 LD 光源输出端经过光隔离器连接到光功率计上，可以测得输入光功率。

(3) 将光环行器正向接入，以 1 端作为输入端，在 2 端涂上折射率匹配液，将光功率计接在环行器 3 端，测得输出光功率。

(4) 代入光环行器方向性计算公式(2-5.17)，可以算出 1 至 2 端的方向性。

(5) 同理可得 2 至 3 端的方向性。

4. 测量回波损耗

(1) 按照光环行器的回波损耗测量原理图 2-5.15 连接各器件。

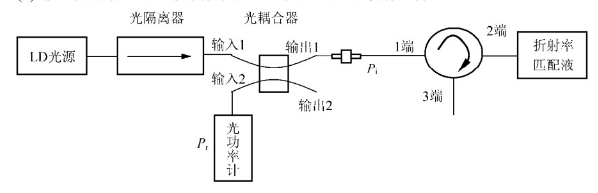


图 2-5.15 光环行器 1 端回波损耗测量原理图

(2) 将 LD 光源输出端连接到光隔离器正向输入端，然后将光隔离器正向输出端连接到光耦合器的输入端 1，用光功率计测量光耦合器输出端 1 端的输出功率，即光环行器的输入光功率。

(3) 将光环行器连入，在光环行器 2 端连接器光纤端面上涂上折射率匹配液。用光功率计测量光耦合器输入端 2 的输出光功率，即光环行器 1 端反射光通过光耦合器的输出光功率。

(4) 由回波损耗的计算公式(2-5.18)求得光环行器 1 端的回波损耗。

需要注意的是，在本实验方案中由于存在光纤耦合器的损耗 Loss_c，测得的反射光功率 P_{2r} 仅为实际反射光功率 P_r 的一部分，故式(2-5.18)应改写为

$$\text{Returnloss} = 10\lg\frac{P_1(\text{mW})}{P_{2r}(\text{mW})} - \text{Loss}_c \tag{2-5.19}$$

对于 3dB 光纤耦合器，Loss_c 约为分束损耗 3dB，当然也可以使用前面的测量值。

六、实验数据与分析

将实验结果记录到表 2-5.1～表 2-5.8 中，并进行各无源器件的特性参数的计算。

表 2-5.1 光隔离器插入损耗

1 端输入光功率 P_1/dBm	
2 端输出光功率 P_2/dBm	
插入损耗 Insertloss/dB	

表 2-5.2 光隔离器隔离度

2 端输入光功率 $P_{2反}$/dBm	
1 端输出光功率 $P_{1反}$/dBm	
隔离度 Isolation/dB	



表 2-5.3　光耦合器数据处理表(1 端为输入端，3 端和 4 端为输出端)

输入光功率 P_1 /dBm	(　　mW)
4 端输出光功率 P_4 /dBm	(　　mW)
3 端输出光功率 P_3 /dBm	(　　mW)
2 端输出光功率 P_2 /dBm	
1 端到 4 端的插入损耗 L_{1-4} /dB	
1 端到 3 端的插入损耗 L_{1-3} /dB	
1 端的附加损耗 L_e/dB	
3 端的分光比 $S_{\%}$/dB	
4 端的分光比 $S_{\%}$/dB	
串音 L_C /dB	

表 2-5.4　光衰减器数据处理表

输入光功率 P_1 /dBm	
输出光功率 P_2 /dBm	
输出光功率 $P_{2\min}$ /dBm	
插入损耗/dB	
衰减范围/dB	

表 2-5.5　光环行器插入损耗

1 端输入光功率 P_1 /dBm	
2 端输出光功率 P_2 /dBm	
1—2 端插入损耗 $\text{Insertloss}_{1\text{-}2}$/dB	

表 2-5.6　光环行器隔离度

2 端输入光功率 $P_{2反}$ /dBm	
1 端输出光功率 $P_{1反}$ /dBm	
1—2 端隔离度 $\text{Isolation}_{1\text{-}2}$/dB	

表 2-5.7　光环行器方向性

1 端输入光功率 P_1 /dBm	
3 端输出光功率 P_3 /dBm	
1 至 3 端方向性 $\text{Directivity}_{1\text{-}3}$/dB	

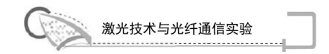


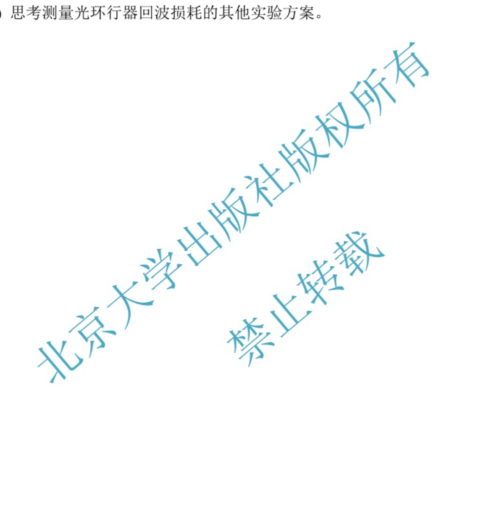
表 2-5.8　光环行器回波损耗($Loss_C$＝3dB)

1 端输入光功率 P_1/dBm	
反射光功率 P_2/dBm	
1 端回波损耗 Returnloss/dB	

七、思考题

(1) 实际测出的光耦合器的分光比是否为 3dB？如果有误差，误差原因是什么？

(2) 思考测量光环行器回波损耗的其他实验方案。



实验 6
半导体激光器输出特性测量

一、实验目的

(1) 学习半导体激光器工作原理和特性。

(2) 掌握半导体激光器 *P-I* 特性曲线以及阈值电流的测试方法。

(3) 了解半导体激光器在阈值上、下的输出光谱特性。

二、实验内容

(1) 测量半导体激光器输出功率和注入电流，并画出 *P-I* 关系曲线。

(2) 根据 *P-I* 特性曲线，找出半导体激光器阈值电流，计算半导体激光器量子效率。

(3) 观测半导体激光器输出光谱。

三、实验原理

光源是把电信号变成光信号的器件，在光纤通信中占有重要的地位。性能好、寿命长、使用方便的光源是保证光纤通信可靠工作的关键。

光纤通信对光源的基本要求有如下几个方面：第一，光源发光的峰值波长应在光纤的低损耗窗口之内，要求材料色散较小；第二，光源输出功率必须足够大，入纤功率一般应在 10 微瓦到数毫瓦；第三，光源应具有高度可靠性，工作寿命至少在 10 万小时以上才能满足光纤通信工程的需要；第四，光源的输出光谱不能太宽以利于传输高速脉冲；第五，光源应便于调制，调制速率应能适应系统的要求；第六，电光转换效率不应太低，否则会导致器件严重发热和缩短寿命；第七，光源应该省电，光源的体积、重量不应太大。

作为光源，可以采用半导体激光二极管(LD，又称半导体激光器)、半导体发光二极管(LED)、固体激光器和气体激光器等。但是对于光纤通信工程来说，除了少数测试设备与工程仪表之外，几乎无例外地采用半导体激光器和半导体发光二极管。因此，半导体光源是光纤通信中光发送机的核心部件。其中，半导体发光二极管 LED 由于性能的局限，不能很好地满足宽带、长距离的光纤通信系统的要求，而半导体激光器 LD 具有输出光功率高、光束质量好、相干性好和调制带宽大的突出优点，被用于绝大部分的光纤通信系统中。

(一) 半导体材料的发光原理

对于二能级系统，存在自发辐射、受激辐射和光吸收 3 个过程，如图 2-6.1 所示。在自发辐射中，处于高能态的电子按照一定的概率自发地跃迁到低能态上，并发射一个能量

为 $h\nu = E_C - E_V$ 的光子，产生的光子具有随机方向、相位和偏振态，即为非相干光，这正是半导体发光二极管(LED)的基本原理。在受激发射过程中，处在高能态的电子在外界光场的感应下，发射一个和入射光子一模一样的光子，并跃迁到低能态。产生的光子的发射方向、相位、频率和偏振态都与激发它们的光子相同，即为相干光，半导体激光器(LD)正是通过受激辐射发光。而在受激吸收中，如果入射光子的能量 $h\nu$ 近似等于 $E_C - E_V$，光子能量就会被吸收，同时低能态上的电子跃迁到高能态。在外加电场的作用下，形成电流，产生光生电流，半导体光检测器正是基于这种效应。

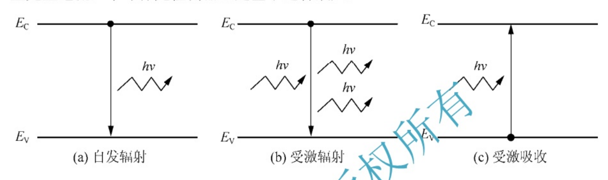


图 2-6.1　电子的 3 种跃迁过程

半导体材料的能级结构不是分离的能级，而是有一定宽度的带状结构。高能态的导带的电子通常是不稳定的，会向低能态的价带跃迁，而能量以光子的形式释放出来，光子的能量 $h\nu$ 等于导带 E_C 和价带 E_V 的能量差，即禁带能量 E_g。抛物线型的导带和价带分布是半导体材料典型的能带结构。在这种能带结构中，电子在导带和价带上出现的概率可由费米-狄拉克分布描述，为

$$f_c(E_2) = \frac{1}{1+\exp[(E_2 - E_{fc})/kT]} \tag{2-6.1}$$

$$f_v(E_1) = \frac{1}{1+\exp[(E_1 - E_{fv})/kT]} \tag{2-6.2}$$

式中：E_{fc} 和 E_{fv} 为导带和价带的费米能级；E_1 和 E_2 为电子在导带和价带的能量。因为 $T>0$，在热平衡状态下，电子首先占据低能量的价带，因此 $N_1 > N_2$，且上下能级跃迁相对平衡，受激吸收大于受激辐射，自发辐射处于主导地位，无法得到相干光。要获得相干光，必须打破热平衡，使 $N_1 < N_2$，使受激辐射大于受激吸收，实现粒子数反转分布。这样，当光通过物质时，能产生放大作用。对于半导体材料，要实现粒子数反转分布，就需要满足 $f_c(E_2) > f_v(E_1)$，即

$$E_{fc} - E_{fv} > E_2 - E_1 > E_g \tag{2-6.3}$$

可见，费米能级差必须超过带隙能量才能发生粒子数反转。热平衡时，两费米能级重合，要使费米能级分开，必须有外部能源向半导体泵浦能量。最方便的方法就是采用正向偏置的 PN 结。

对于本征半导体材料，低能量的价带上聚集着许多电子，而高能量的导带上几乎没有电子，费米能级位于带隙中间。若在本征半导体中掺入带有多余电子的原子，电子在晶格中自由移动，并且位于导带中，这种半导体叫 N 型半导体，掺入的原子叫施主杂质。N 型



掺杂将使费米能级向导带移近。对于重掺杂 N 型半导体，费米能级将位于导带内，称为兼并型 N 型半导体。相反，若在本征半导体中掺入缺少电子的原子，晶格中出现可以自由移动的空穴，并且位于价带中，这种半导体叫 P 型半导体，掺入的原子叫受主杂质。P 型掺杂将使费米能级向价带移近。对于重掺杂 P 型半导体，费米能级将位于价带内，称为兼并型 P 型半导体。

当 P 型半导体和 N 型半导体接触形成 PN 结时，如图 2-6.2(a)所示，载流子的浓度差引起扩散运动，P 区的空穴向 N 区扩散，剩下带负电的电子，从而在靠近 PN 结界面的区域形成一个带负电的区域。载流子的扩散运动形成了一个空间电荷区，形成一个内建电场，方向由 N 区指向 P 区。在内建电场作用下，载流子将产生漂移运动，且方向正好与扩散运动相反。开始时，扩散运动占优势，但随着内建电场的增强，漂移运动也不断加强，最后漂移运动完全抵消了扩散运动，达到平衡状态。动态平衡下，形成一个相对稳定的电荷区，即为 PN 结。而一个热平衡系统只能有一个费米能级，要求 P 区和 N 区高低不同的费米能级达到相同水平。因此 PN 结的能带会发生弯曲。

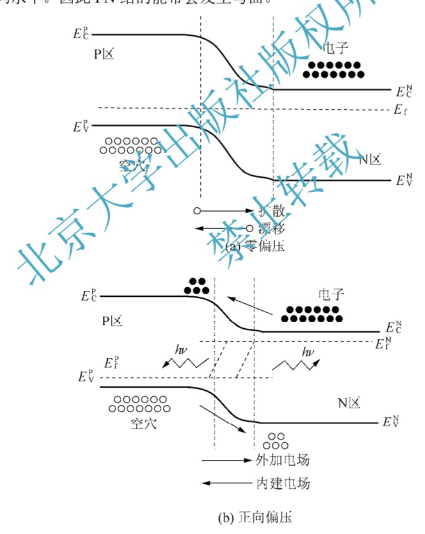


图 2-6.2　PN 结的能带结构

当 PN 结加上正向偏压(P 接正，N 接负)时，如图 2-6.2(b)所示，外加电场的方向正好

与内建电场的方向相反，削弱了内建电场的作用，打破了原来的动态平衡，扩散运动超过了漂移运动，P 区空穴通过 PN 结不断流向 N 区，而 N 区的电子亦流向 P 区，形成正向电流，且电流随外加电压的增加而增大。在这种情况下，N 区电子向 P 区扩散时，在 P 区边界附近形成电子的积累，成为非平衡少数载流子；而 P 区空穴向 N 区扩散时，在 N 区边界附近形成空穴的积累，成为非平衡少数载流子。这些非平衡少数载流子可以通过自发辐射或受激辐射复合而发出光子，这就是半导体光源发光的基本原理。若是自发辐射发光，是 LED 光源的发光原理，若是受激辐射发光，则是 LD 光源的发光原理。此时在非热平衡状态下，费米能级发生分离，当满足式(2-6.3)时，可实现粒子数反转，能产生光放大作用。

最早的 PN 结采用的是同质结的结构，即 PN 结的两边使用相同的半导体材料通过不同的掺杂而成。但同质结的有源区对载流子和光子的限制作用很弱，载流子复合范围宽，载流子浓度低，发光效率不高。于是在同质结的基础上，通过在宽带隙的 P 型和 N 型半导体材料之间插进一薄层窄带隙的材料(称为激活区)，形成双异质结。引入这个夹层后，带隙差形成的势垒将电子和空穴限制在激活区复合发光，从而提高了复合效率。另外，由于低掺杂或本征的窄带隙半导体材料的折射率较正常掺杂的宽带隙半导体材料的折射率稍高，使光场(光子)有效地限制在激活区，增强了光子与载流子之间的相互作用。由于双异质结对载流子和光子都有限制作用，所以目前的半导体光源多采用这种结构。

(二) LD 的工作原理

半导体激光器是通过向半导体 PN 结注入正向电流，实现粒子数反转分布，产生受激辐射，再利用谐振腔的正反馈，实现光放大而产生激光振荡。因此半导体激光器包括 3 个组成部分，分别是激光工作物质、泵浦源和光学谐振腔。激光工作物质是使粒子数反转的工作物质；泵浦源对工作物质进行激励，实现粒子数反转；光学谐振腔则维持激光振荡和改善输出激光质量。激光工作物质和泵浦源是为了通过实现粒子数反转而产生光增益。但粒子数反转分布是产生受激辐射的必要条件，还不能产生激光。为产生激光，必须把激活物质置于光学谐振腔中，产生光反馈，对光的频率和方向进行选择，才能获得连续的光放大和激光振荡输出。

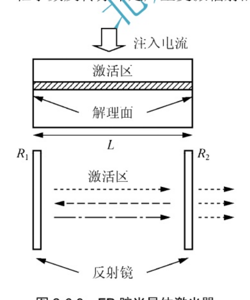


图 2-6.3　FP 腔半导体激光器

光反馈由激活区两端的自然解理面构成，这是一种基本的光学谐振腔，相当于由两个反射率分别为 R_1 和 R_2 的平行反射镜构成，如图 2-6.3 所示，被称为法布里-珀罗(Fabry-Perot)谐振腔，简称 FP 腔。由于谐振腔内的激活物质具有粒子数反转分布，能产生自发辐射光；自发辐射光作为入射光，经反射镜反射，沿轴线方向传播的光被放大，而沿非轴线传播的光被减弱；反射光经多次反馈，不断得到放大，方向性得到改善，增益大幅度得到提高，一部分光从反射镜透射出去形成激光输出。由于 LD 激活区存在吸收、散射等各种损耗以及 FP 腔的输出损耗，光增益必须大于一定值才能形成激光振荡。此时输出的激光必须满足 FP 腔决定的相位条件。因此，



形成激光需要满足阈值条件和相位条件这两个条件，且这两个条件可以通过考察光波在谐振腔内往返一次实现自再现而推导得到，即

$$g_{\text{th}} = \alpha_{\text{int}} + \frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \tag{2-6.4}$$

$$\upsilon = \upsilon_{\text{m}} = mc/(2nL) \tag{2-6.5}$$

式中：g_{th} 为阈值增益；α_{int} 为激活区其他机制引起的功率损耗系数；L 为腔长；υ 为光频率；m 为整数。式(2-6.4)表明增益必须大于腔损耗才可能形成激光。式(2-6.5)表明振荡的激光频率需满足的条件。当 m 取不同值时，对应于不同纵模，且纵模间隔 $\Delta\upsilon = c/(2nL)$。由于半导体材料的增益谱很宽，FP 腔的 LD 通常是多纵模振荡的，成为多模半导体激光器。采用特殊结构可以实现半导体激光器的单纵模工作。

(三) LD 的结构

半导体激光器的结构多种多样，通常采用的是双异质结结构。双异质结半导体激光器又可分为宽面和条形两种。图 2-6.3 中所示为宽面 LD。虽然在垂直于结平面的方向上载流子和光子都被限制在很窄的范围，但在平行于结平面的方向上，光子和载流子没有受到限制，因此输出光斑具有椭圆的形状。并且电流是沿整个平行于结平面的激活区平面注入，因此激光器的预置电流很高。因此，在光纤通信中几乎不采用宽面结构，而采用条形结构，在输出平面上对载流子和光子进行横向限制，从而提高载流子和光子浓度，降低激光器阈值，并提高耦合入纤功率。目前，条形 LD 采用两种方法对载流子和光子进行横向限制，分别是增益导引和折射率导引。图 2-6.4 为两种条形双异质结半导体激光器的典型结构。

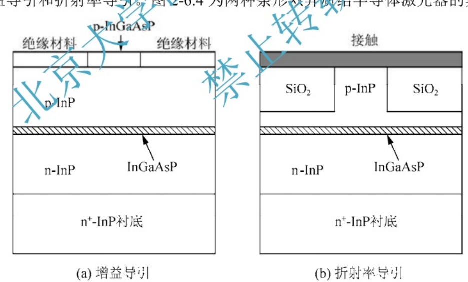


图 2-6.4　条形双异质结半导体激光器

在增益导引 LD 中，通过对注入电流进行控制，使其集中于激活区中央的条形区域中。如图 2-6.4(a)所示，在 P 型材料顶部的边缘沉积了一层绝缘材料，只剩下中央条形区域可以注入电流。在折射率导引 LD 中，在电流限制基础上，通过横向引入一个折射率差，形成与纵向双异质结类似的结构，从而实现对光子的限制。图 2-6.4(b)所示为一种脊形折射率导引 LD。脊形波导通过先腐蚀掉一部分 P 型层，然后沉积上 SiO_2 而构成。因为 SiO_2

的折射率比半导体材料低，因此在横向上出现折射率差从而对光波进行限制。

(四) LD 的工作特性

1. *P-I* 特性

LD 的 *P-I* 特性是指 LD 的输出功率随注入电流的变化关系，典型的 *P-I* 特性曲线如图 2-6.5 所示。

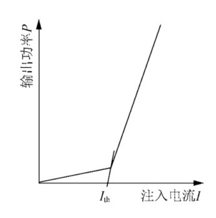


图 2-6.5　条形双异质结半导体激光器

1) 阈值电流

从图 2-6.5 中可以看到，当外加正向电流达到某一值时，输出光功率将急剧增加，这时将产生激光振荡，这个电流值称为阈值电流，用 I_{th} 表示。当注入电流小于阈值电流时，为自发辐射。当注入电流大于阈值电流时，为受激辐射，发射出激光。

一般对阈值的描述有两种：一种是，在 *P-I* 特性曲线的快速上升段取其中的线性部分延长线与横坐标的交点为阈值；另一种是，把荧光部分和激光部分分别近似看成两条直线，两条直线的交点即为阈值。

2) 量子效率

当半导体激光器产生受激辐射时，输出功率与注入电流具有较好的线性关系。这段曲线斜率定义为量子效率 η ，为发射光功率与注入电流之比，即

$$\eta = \frac{\Delta P}{\Delta I} \tag{2-6.6}$$

P-I 特性曲线会随器件的工作温度发生变化。随温度升高，P-I 特性曲线的斜率会下降，即量子效率下降；*P-I* 特性曲线随温度升高，阈值电流 I_{th} 将不断升高。由于 LD 的工作温度的变化会改变半导体材料的带隙和折射率，因此 LD 的发射波长也会随温度变化，输出波长随着温度的增加将向长波长方向漂移。除此之外，随注入电流的升高，LD 输出光功率出现饱和。其原因是在较大的注入电流下 PN 结的温度升高，非辐射复合增加，输出功率下降。

2. 模式和光谱特性

半导体激光器的模式可分为纵模和横模两种。纵模决定频谱特性，横模决定光场的空间分布。LD 包括多纵模和单纵模两种，前者谱宽较宽，后者谱宽较窄。对高速光纤通信系统来说，单纵模窄谱宽 LD 有利于减小光纤色散的影响。

图 2-6.6 为半导体激光器的典型光谱。光谱范围内辐射强度最大所对应的波长为中心波长 λ_0。辐射强度最大值下降一半处对应的波长范围称为谱线宽度 $\Delta\lambda$ 。

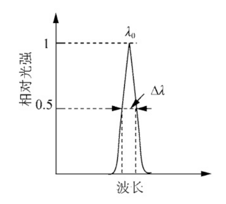


图 2-6.6　半导体激光器的典型光谱

半导体激光器的一般线宽为 1～5nm。半导体激光



器的辐射光谱与注入电流有关。当器件驱动电流比阈值电流略微大一点时，半导体激光器常为多纵模输出。当电流增加时，总的线宽变窄，纵模模式数目减少。电流足够大时，光谱中将可以只包含一个模式，即单纵模半导体激光器。图 2-6.6 给出的就是单纵模激光器的光谱，线宽比多纵模激光器的线宽窄得多。

3. 调制特性

激光具有极好的时间相干性和空间相干性，与无线电波相似，易于调制，且光波的频率极高，能传递信息的容量很大。加之激光束发散角小，光能高度集中，能传输较远距离，易于保密。

将欲传输的信息加载于激光辐射的过程称为激光调制。从已调制的激光辐射中还原出所加载信息的过程，称为解调。激光调制分为直接调制和间接调制两类。间接调制是指加载调制信号在激光形成以后进行，即调制器置于激光谐振腔外，在调制器上加调制信号电压，使调制器的某些物理特性发生相应变化，当激光通过调制器时即可得到调制。因此，外调制不是改变激光器参数，而是改变已经输出的激光的参数。外调制的方法根据原理不同，常分为电光调制、声光调制、磁光调制和干涉调制等。直接调制是指加载的调制信号在激光振荡的过程中进行，以调制信号的规律去改变振荡的参数，从而达到改变激光输出特性来实现调制目的。直接调制技术具有简单、经济、容易实现等优点，但是易受到半导体光源输出功率、带宽和频率啁啾的限制，适用于小功率、较低速率和带宽的光纤通信中。间接调制则具有啁啾小、调制速率高等优点，但是技术复杂，成本较高，适用于高速、宽带的光纤通信系统中。

在直接调制中，由于半导体激光器的结电容特性，使得激光器对于不同输入频率的响应并不相同。一般频率越高，输出的光强调制振幅越小。将当输入信号的振幅相同情况下，输出光强度调制是低频调制下振幅的一半时的频率定义为半导体激光器的调制带宽。

半导体激光器的调制特性决定了调制到半导体激光器上的最高带宽。LD 的注入电流可表示为

$$I = I_{\mathrm{b}} + I_{\mathrm{m}} f(t) \tag{2-6.7}$$

式中：I_{b} 为偏置电流；I_{m} 为调制电流；$f(t)$ 为调制电流的波形。

LD 的调制相应分为小信号调制和大信号调制两种。小信号调制指偏置电流在阈值以上，即 $I_{\mathrm{b}} > I_{\mathrm{th}}$，调制电流幅度 $I_{\mathrm{m}} = I_{\mathrm{b}} - I_{\mathrm{th}}$。这种情况下，LD 的调制带宽通常与偏置电流呈正相关的趋势，即偏置电流越高，带宽越大。但实际运用中偏置电流不能过大，否则会损坏 LD。当偏置电流 I_{b} 在阈值 I_{th} 以上，以幅度 $I_{\mathrm{m}} > I_{\mathrm{b}} - I_{\mathrm{th}}$ 的矩形脉冲电流进行调制时，为大信号调制。在大信号调制下，光脉冲并不表现为矩阵脉冲，光脉冲的上升时间和下降时间会展宽，从而限制 LD 的调制速率。一般来说，LD 的调制速率可达到 10Gbps，如果速率要求更高，则需要采用外调制技术。

(五) 光谱分析仪

光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer，OSA)是一种应用十分广泛的仪器，在实验室使用较多，主要用来测量波长函数光功率，具有波段范围宽、动态范围大、灵敏度高等特点。随着计算机技术与控制技术的发展，智能化光谱分析仪的功能不断加强，操作更简便，

结果更精确。在光纤通信中，光谱分析仪除了用于测试 LD 及 LED 光谱，还可以测试无源器件的传输特性以及光纤放大器的噪声和增益等。目前用于光纤通信的高精度光谱分析仪的分辨率可达 0.01nm，波长线性度可达±0.01nm，波长范围可达到 600～1700nm，并且采用噪声抑制技术可使测量灵敏度达到−90dBm。

光谱分析仪出现的比较早，采用的技术比较多，通常可被分为 3 类：衍射光栅型、Fabry-Perot 干涉仪型和 Michelson 干涉仪型。衍射光栅型光谱仪可以测量 LD 和 LED 的光谱，其分辨率可变，典型值从 0.1nm 到 10 nm。Fabry-Perot 干涉仪型光谱仪具有固定细小的分辨率，比衍射光栅型光谱分析仪测量宽度小。Michelson 干涉仪型光谱分析仪使用直接相干长度测量，通过计算被测干涉图的傅里叶变换显示光谱。在光纤通信中多使用衍射光栅型光谱分析仪。

衍射光栅型光谱分析仪的结构原理如图 2-6.7 所示。衍射光栅型光谱分析仪是基于光分散的基本原理，通过内部单色仪来实现光谱的获取。光栅单色仪用光栅衍射的原理获得单色光，可以从发出复合光的光源(即不同波长的混合光的光源)中得到单色光，并且可以通过改变光栅的偏转角度得到某个波长的光。首先待测光从输入光阑进入，经准直镜反射后变成平行光，然后进入光栅，构成光栅的扁平镜表面有许多凹槽，它使不同波长的光产生不同角度的反射。衍射公式为

$$\sin\theta_{\rm i}+\sin\theta_{\rm d}=\frac{N\lambda}{d} \tag{2-6.8}$$

式中：$\theta_{\rm i}$ 为入射角；$\theta_{\rm d}$ 为衍射角；$N_{\rm i}$ 为衍射级数；λ 为波长；$1/d$ 为光栅常数。不同波长的零级衍射光的出射方向都相同，其他各级主极大衍射光对不同的波长将有不同的方向。因此，我们调整聚焦镜使它只能接收特定角度的反射光。调整输出光阑到某一确定位置，使聚焦镜的光聚焦到这一位置，这样就只能使某些特定波长成分的光通过输出光阑。通过旋转光栅(单色仪光栅的角度由一台步进电机控制)，可以改变通过光阑的光波波长，同时通过改变输入光阑和输出光阑的宽度可以改变波长分辨率。最后，输出光通过探测器进行光谱的获取。

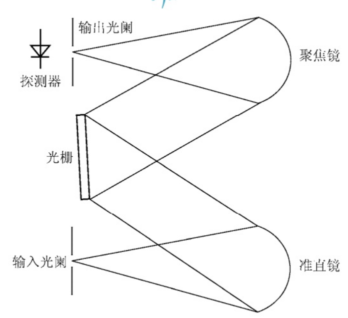


图 2-6.7　衍射光栅型光谱分析仪的结构原理



光谱分析仪的特征参数有波长范围、波长分辨率、测量幅度范围等。以本实验所用光谱分析仪为例，具体使用方法如下。

1. 开机校准

光谱分析仪内部通常有一个标准光源用于校准波长。当使用该光源校准时，用一根单模光纤把光输入连接器和标准光源光输出连接器连接起来，使标准光源发出的光进入光输入接口。

(1) 打开电源后，进行光路校准。按下[SYSTEM](系统)功能键，显示软控键菜单。按下软控键菜单中的<MORE 1/3>键，显示一级软控键子菜单。<OPTICAL ALIGNMENT>键用于调整本仪器里使用的单色仪光系统的光轴，使用的光源必须是安装在仪器内部的标准光源。按下此键，显示二级软控键子菜单。按下<EXECUTE>键，自动执行光轴调节。在执行期间，窗口处于持续打开状态，此键反白显示；波长校准完后，窗口消失，重新显示一级软控键子菜单。

(2) 波长校准。一级软控键子菜单中的<WL CAL>键用于校对波长。按下此键时，屏幕上就会出现一个包含信息的窗口，同时显示二级软控键子菜单。按<BUILT-IN SOURCE>键，设定要进行波长校准的光源为内部光源；然后，按下<EXECUTE>键，执行波长校准。在校准期间，窗口处于持续打开状态，此键反白显示。完成波长校准后，窗口消失，重新显示一级软控键子菜单。此时，屏幕上显示按下<WL CAL>键前的波形。

2. 基本测量

1)用[SWEEP]功能键和<AUTO>键测量

在不知道波长和输入光的能级时，使用<AUTO>键进行测量。

(1) 将待测量光源连到[OPTICAL INPUT]连接器上。

(2) 按下[SWEEP]功能键，显示软控键菜单。按下<AUTO>键，根据输入光自动将测量条件设定到最佳状态。按下此键，屏幕将反向显示软键，并获得适合测量输入光的最佳条件(中心波长、扫描宽度、参考能级以及分辨率)。之后，继续反向显示<REPEAT>(重复)键，进行重复扫描。

(3) 停止扫描，按下<STOP>键。

2) 用手动操作测量

如果用<AUTO>键测量得不到所希望的测量条件，可用[FUNCTION]区的开关手动设定每个测量条件。以 LD(激光二极管)光源(波长：约 1310nm，能级：约-10dBm)测量为例，步骤如下。

(1) 将待测 LD 光源连到[OPTICAL INPUT]连接器上。

(2) 按下[CENTER]功能键，显示软控键菜单。按下<CENTER>键，在中断区用旋钮或步进键设定光源的中心波长。在本例中，将平均波长设为 1310nm。对于该设置，可以在十键区输入[1][3][1][0] [nm/ENTER]。

(3) 按下[SPAN]功能键，显示软控键菜单。按下<SPAN>键，在中断区用旋钮或步进键设置一个比 LD 光源谱宽更宽的扫描宽度。在本例中，将扫描宽度设为 5nm。可以在十键区输入[5][nm/ENTER]。

(4) 按下[LEVEL]功能键，显示软控键菜单。按下<REF LEVEL>键，在中断区用旋钮

或步进键将光源能级设到参照能级上。在本例中，在参照能级中设–10dBm。可以在十键区输入[–][1][0] [nm/ENTER]或[mm/ENTER]。

(5) 按下[LEVEL]功能键，显示软控键菜单。按下<LOG SCALE>键，在中断区用旋钮或在十键区将能级标尺设为 5dB/VID。可以在十键区输入[5] [nm/ENTER]或[mm/ENTER]。

(6) 按下[SETUP]功能键，显示软控键菜单。按下<RESOLN>键，在中断区用旋钮或步进键将分辨率设为 0.01nm。可以用十键区输入[0][.][0][1][nm/ENTER]。

(7) 按下[SETUP]功能键，显示软控键菜单。按下<AVERAGE TIMES>键，在中断区用旋钮或步进键将平均次数的数字设为 1。可以用十键区输入[1] [nm/ENTER]或[mm/ENTER]。

(8) 按下[SETUP]功能键，显示软控键菜单。按下<SENS>键，在中断区用旋钮或步进键将测量灵敏度设为 NORM RANGE HOLD。

(9) 按下[SWEEP]功能键，显示软控键菜单。按下<REPEAT>键，执行重复扫描操作。

(10) 观察测量结果(波形)，反复选择步骤(3)～(8)的每一测量条件，直到为合适的值。

(11) 若要停止扫描操作，可按下[SWEEP]功能键，再按<STOP>键。

设置标准为：中心波长设为波形的峰值波长；扫描宽度设为整个波形可见的范围；参考能级设为波形的峰值能级；分辨率设为波形不变化的水平。在使用光谱分析仪之前需要注意一点，应先测一下待测光的光功率，确保输入光功率不超过光谱分析仪的输入允许范围，否则会损坏光谱分析仪的光口。当输入光功率超出仪器允许范围时，光谱分析仪若内置有光衰减器，则应开启内置衰减器。

四、实验仪器设备

驱动电流可调半导体激光器　　光功率计　　光谱仪　　光纤跳线

五、实验步骤

(1) 按照图 2-6.8 将驱动电流可调半导体激光器与光功率计用光纤跳线连接。



图 2-6.8　半导体激光器特性测量实验框图

(2) 打开半导体激光电源，将驱动电流逐渐调大，记录不同驱动电流下的光功率计读数，将数据记录到表 2-6.1 中。

(3) 按照图 2-6.8 将驱动电流可调半导体激光器与光谱仪连接。

(4) 将驱动电流分别设置在阈值电流以下和以上，观察光谱仪上激光输出光谱的变化。

六、注意事项

半导体激光器驱动电流不可超过 40mA。



七、实验数据与分析

(1) 将实验数据记录到下表中，并进行计算。

表 2-6.1　LD 的 *P*-*I* 特性测试数据表

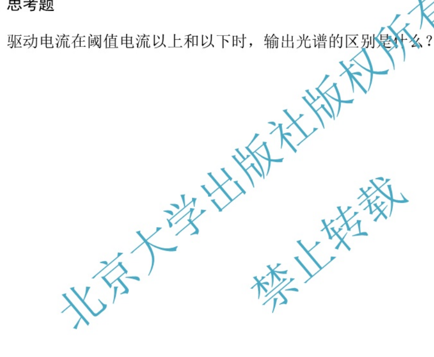
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I/mA															
P/mW															

(2) 绘制 *P*-*I* 曲线，找出阈值电流。

(3) 计算半导体激光器量子效率。

八、思考题

驱动电流在阈值电流以上和以下时，输出光谱的区别是什么？



实验 7

数字光纤通信系统误码率的测量

一、实验目的

(1) 掌握数字光纤通信系统的构成。

(2) 熟悉误码、误码率的概念。

(3) 了解误码仪的工作原理，掌握误码率的测量方法。

二、实验内容

测量不同码率下波分复用系统的误码率。

三、实验原理

(一) 数字信号光纤通信系统

数字信号光纤传输技术是光纤通信技术的一个重要支柱，是一种通过光纤信道传输数字信号的通信系统。数字信号的电平随时间周期呈离散分布，只取有限个离散值，如2 电平的“1”和“0”，3 电平的“+1”“0”和“−1”等。数字光纤通信系统对信道的非线性失真不敏感，在通信过程中，即使有多次中继也会保持较高的传输质量。因而，与模拟光纤通信系统相比，数字光纤通信系统对光源特性的线性要求和对接收信噪比的要求都不高，更能充分发挥光纤通信的优势，更能体现光纤通信长距离、大容量和高质量传输信息的特征。

典型的数字光纤通信系统如图 2-7.1 所示，通常包括接口整形与编码电路、数字光发射机、光纤线路、数字光接收机、整形放大电路、时钟恢复电路和判决电路等部分。

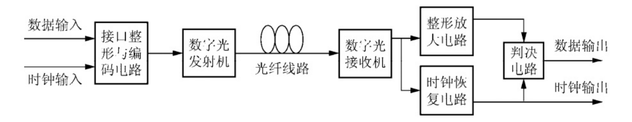


图 2-7.1　典型数字信号光纤通信系统

(二) 误码特性

误码性能参数是光纤数字通信系统的重要质量指标。误码的基本含义是：在数字传输系统中，当发送端发送“1”码时，接收端收到的却是“0”码，而当发送端发送“0”码



时，接收端收到的却是“1”码，这种收发信码的不一致就称为误码。造成误码的原因是系统的噪声，脉冲抖动和光纤的色散等。这里所用的误码特性参数反映了数字信号的传输过程受到损害的程度。

数字传输系统的误码特性用误码率衡量。误码率定义为在特定的一段时间内所接收到的数字码元误差数目与在同一时间内所收到的数字码元总数之比。对于数字系统来说，实际上指的是比特误码率 BER，即每个码元为 1 比特时的误码率，表达式为

$$\text{BER}=\frac{\text{误码的码元数}}{\text{传输码元总数}} \tag{2-7.1}$$

误码率与系统的传输码速和测试时间的长短有关。同时，由于误码是随机的，所以还与具体的时间有关，误码率沿数字段长度是线性积累的，数字段内的中继段越多，误码率越大。

误码率是衡量数字系统传输质量好坏的一个主要指标。对于不同的通信业务，误码的影响后果也不同。对于电话信息的影响是产生噪声；在 PCM 通信方式中，误码率对话音的影响程度见表 2-7.1。

表 2-7.1　误码率对话音影响程度

误码率	受话者的感觉
10^{-6}	感觉不到干扰
10^{-5}	在低话音电平范围内感觉到有干扰
10^{-4}	在低话音电平范围内有个别“喀喀”声干扰
10^{-3}	在各种话音电平范围内都感觉到有干扰
10^{-2}	强烈干扰，听懂程度明显下降
5×10^{-2}	几乎听不懂

国际电信联盟通信标准化组织(International Telecommunications Union-Telecommunication Standardization Sector，ITU-T)建议 64kbps 接口处的 3 项误码性能参数为：劣化分(DM)、误码秒(ES)、严重误码秒(SES)。这 3 项参数的定义和要求如下。

1. 误码秒(ES)

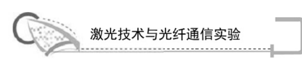
在可用时间内，至少出现一次误码的秒。对于 27500km 的假设参考数字连接(参看光纤通信系统测量有关书籍)而言，其指标要求为：从总观测时间 TL 中扣除不可用时间(当误码率连续 10s 劣于 10^{-3} 时，不可用秒开始，加上前面 10s，被看作不可用时间)后累积的误码秒数目/TL 中的可用秒数目≤8%。

2. 严重误码秒(SES)

在可用时间里，误码率劣于 10^{-3} 的秒，称为严重误码秒。其性能指标为：从总测量时间 TL 中扣除不可用时间后积累的严重误码秒数目/TL 中的可用时间秒数目≤0.2%。

3. 劣化分(DM)

因为当全程平均误码率高于 10^{-5} 时，对于低声讲话的干扰影响刚可以觉察到。为留有余地，取 10^{-6} 为判别劣化分的门限值。平均误码率高于 10^{-6} 的分钟称为劣化分。其指标为：从总观测时间 TL 中扣除不可用时间和严重误码秒后所得的分钟数为可用分，在 TL 内积



累的劣化分数目/可用分数目≤10%。

(三) 误码仪工作原理

误码仪是用于以光纤、微波、卫星、同轴电缆等为传输媒质 PCM1～3 次群通信系统的误码测试，集发射与接收于一体，可对被测试系统的传输质量进行综合评价。

1. 发射部分工作原理

误码测试仪发射部分原理框图如图 2-7.2 所示。发射部分是一个通信信号源，用以产生各种速率和各种编码格式的图形信号。可以设两种伪随机(PRBS)图形和一种 1～16bit 字图形，并可在这些图形中插入所要求的误码率。输出电路对图形进行 AMI、HDB3 编码，或形成 NZ、NRZ 信号，CPU 根据面板设置控制上述各电路。

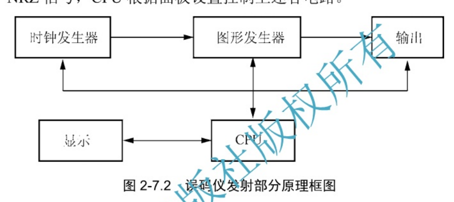


图 2-7.2 误码仪发射部分原理框图

2. 接收部分工作原理

接收部分是误码仪的核心，用以检测设备和线路能否无丢失地传送数据，其原理框图如图 2-7.3 所示。

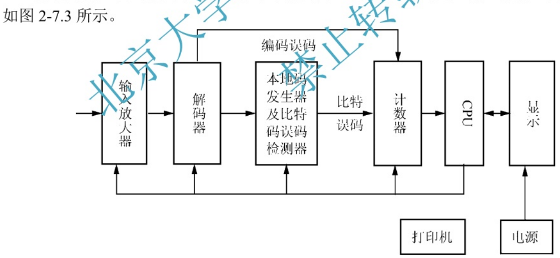


图 2-7.3 误码仪接收部分原理框图

输入放大器将接收的数据放大，整形后送入解码器进行编码误码的解码或数据的解码。将编码误码直接送入计数器。数据解码为二进制 NRZ 并送入误码检测器。误码检测器产生标准的本地码图形(PRBS 或字图形)并与解码后的接收数据图形(应与本地图形一样)逐位进行比较，如有差异即为比特误码。误码检测器检出的误码送入计数器计数，再送 CPU 处理。



在测试结果中，误码测试仪上可以即时观察到 EC(误码计数)、SER(秒误码率)、ER(误码率)、EFS(无误码秒)、ES(误码秒)、SES(严重误码秒)、US(不可用秒)，DM(劣化分)、ES%(误码秒百分数)、SES%(严重误码秒百分数)、US%(不可用秒百分数)、DM%(劣化分百分数)等参数。

四、实验仪器设备

误码测试仪　　1310nm/1550nm 单模调制光源　　光接收机　　光纤

五、实验步骤

(1) 按图 2-7.4 连接好仪器，开机。

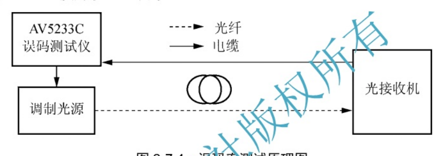


图 2-7.4　误码率测试原理图

(2) 使光源工作在 EXT 外调制方式。

(3) 按误码测试仪面板上[翻页]键或[→][←]键，分别使光标激活速率、码型、图形、误码方式、误码率等选项，按[+]或[-]键，设置误码测试仪的时钟频率为 2MHz，码型为 AMI，图形为 2^{15-1}，误码方式为 BIT，插入误码率为“0”。

(4) 按误码测试仪[开始/停止]键，开始测试，这时误码显示应为“0”。

(5) 时钟频率仍设置为 2MHz，设置插入误码率分别为 10^{-3} 和 10^{-6}，观察这时它们测量的误码率是否与插入的误码率相同，并在一定时刻按[开始/停止]键，停止测试，填写表 2-7.2。

(6) 改变时钟频率为 8MHz，观察这时它们测量的误码率是否与插入的误码率相同。

六、实验数据与分析

认真观察记录数据，填写表 2-7.2。

表 2-7.2　时钟频率为 2MHz 时传输系统误码表

时钟频率	插入误码率	EC	SER	ER	ES	ES%	SES	SES%
2MHz	0							
2MHz	10^{-3}							
2MHz	10^{-6}							

七、思考题

讨论影响误码和误码率的因素。

实验 8

信号眼图的测试

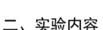
一、实验目的

(1) 了解眼图产生的基础，根据眼图测量数字通信系统性能的原理。

(2) 学习通过数字示波器调试、观测眼图。

(3) 掌握判别眼图质量的指标。

(4) 熟练使用数字示波器和误码仪。



二、实验内容

(1) 调试数字光纤通信系统眼图。

(2) 测量数字光纤通信系统眼图特性。

三、实验原理

眼图是估计数字传输系统性能的一种十分有效的实验方法。这种方法已广泛应用于数字通信系统，在光纤数字通信中也是评价系统性能的重要实验方法。误码率是最终结果，眼图可用于分析形成误码的原因。眼图是在时域进行的用示波器显示二进制数字信号波形的失真效应的测量方法。图 2-8.1 是测量眼图的装置图。由 AV5233C 误码仪产生一定长度的伪随机二进制数据流(AMI 码、HDB3 码、RZ 码、NRZ 码)调制单模光产生相应的伪随机数据光脉冲并通过光纤活动连接器注入单模光纤，经过光纤传输后，再与光接收机相接。光接收机将从光纤传输的光脉冲变为电脉冲，并输入到 AV4451(500MHz)示波器，示波器显示的扫描图形与人眼相似，因此称为眼图。

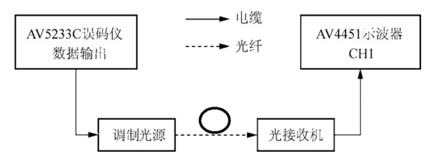


图 2-8.1　眼图测量装置

用眼图法测量系统时应有多种字形，可以采用各比特位上 0 和 1 出现的概率相等的随机数字信号进行测试。AV5233C 误码仪用来产生伪随机数字序列信号。在这里“伪随机”的意义是伪随机码型发生器产生 N 比特长度的随机二进制数字信号，是数字序列在 N 比特



后发生重复，并不是测试时间内整个数字序列都是随机的，因此称为“伪随机”。伪随机序列如果由 2 比特位组成，则共有 4 种组合，3 比特数字信号有 8 种组合，N 比特数字信号有 2^N 个组合。伪随机数字信号的长度为 2^N-1，这种选择可保证字形不与数据率相关。例如 N 可取 7、10、15、23、31 等。如果只考虑 3 比特非归零码，应有如图 2-8.2 所示的 8 种组合。将这 8 种组合同时叠加，就可形成如图 2-8.3 所示的眼图。

图 2-8.2　3 比特非归零码的 8 种组合

图 2-8.3　8 种组合同时叠加形成的眼图

许多数字通信系统的重要性能可以从眼图测试中得到。为了理解眼图测量原理，考虑图 2-8.4 所示简化的眼图，可以得到关于信号幅度失真、定时抖动和系统上升时间等系统性能参数。

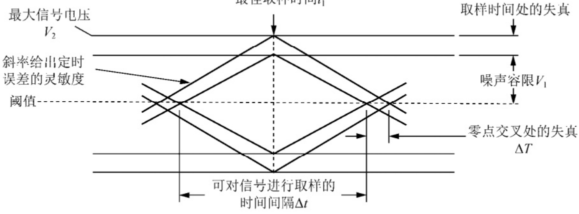


图 2-8.4　简化的眼图

接收信号的最佳取样时间是纵向眼开度最大的时刻t_1。理想情况下$V_2-V_1=0$，纵向眼开度为 1。由横向眼开度确定的时间宽度定义了不会由于码间干扰产生误码的时间范围Δt。眼开度受噪声和码间干扰的影响，从眼图的张开度可以估计出码间干扰的大小，判决时刻过门限失真量的大小以及定时抖动等。

数字信号系统的幅度噪声会使眼开度减小，纵向眼开度的高度与最大信号电平V_2定义了最大的幅度畸变。眼闭合度越大(纵向眼开度越小)，说明正确判断信号中“1”与“0”越困难。在最佳取样时间t_1处的眼开度的大小定义了系统的噪声容限：

$$\text{噪声容限}=\frac{V_1}{V_2}\times 100\% \tag{2-8.1}$$

取样时间改变时，眼图边线的斜率定义了系统时间误差的灵敏度：当斜率较小时，时间误差的概率增加。在光纤系统中由于接收机噪声和光纤的脉冲畸变，会产生时间抖动。如果取样时间正好在信号电平与判断阈值水平相交的时刻的中点，则判断阈值电平处失真量ΔT表示了时间抖动大小，用百分率表示为

$$\text{定时抖动}=\frac{\Delta T}{T_b}\times 100\% \tag{2-8.2}$$

式中：T_b为一个比特的时间间隔。

通常上升时间定义为上升沿从幅度的 10%上升到幅度的 90%所需要的时间。当进行光信号的测量时，这些点经常由于噪声和抖动效应变得模糊，因此我们更经常用比较清晰的 20%～80%幅度作为测量值，并用以下近似关系将 20%～80%上升时间变换为 10%～90%上升时间：

$$T_{10-90}=1.25\times T_{20-80} \tag{2-8.3}$$

下降时间的测量与变换关系与上升沿时间类似。

如果理想的随机数据流通过一个理想的线性系统，所有眼图开度应是相同的，并且保持对称。而如果信道传输过程中存在任何非线性效应都会使眼图产生不对称。

用示波器对伪随机数字序列进行观察时，示波器的扫描周期应取为T_b或T_b的整数倍，即扫描频率取为$1/T_b$或$1/(NT_b)$。当示波器扫描频率和信号速率的比改变时，并列的眼睛可以多些或少些。当扫描周期为T_b时，示波器的扫描图形与一只人眼相似，当扫描周期取



为 NT_b 时，并列的眼睛为 N 个。

四、实验仪器设备

误码测试仪　1310nm/1550nm 单模调制光源　光接收机　示波器　光纤

五、实验步骤

1. 实验装置连接

(1) 按照图 2-8.1 所示将误码仪、光源、光接收机、示波器连接好。其中误码仪数据输出口与光源后面的“外调制”口由电缆连接；示波器入口通过 75Ω/50Ω 阻抗变换器与光接收机输出相连接。

(2) 用光纤跳线将光源的输出端与光接收机的输入端相连。

(3) 打开各仪器开关，预热大约 10 分钟，注意将光源面板上的调制方式设为外调制。

2. 眼图实验

1) 用不同码率观测眼图

(1) 将误码仪的“速率”设置为 2M，“图形”设置为 2^{15}-1，“码型”设置为 NRZ(非归零码)。对示波器按下“自动刻度”键，开始观测波形。

(2) 按屏幕下方 DISP 键，将屏幕右上方“Display Mode”由“Averaged”变为“Normal”，再按 TIMB 键，若此时波形过宽，可按屏幕右方的 SEC/DIV 键，调节示波器面板右下方的旋钮或直接从屏幕右方的数字键输入扫描时间，如用数字键输入，建议设置为 200ns/div(按下 200，再按“nsec”键；若“速率”设置为 8M，则扫描时间建议设置为 50nS/div；34M 则为 10ns/div)。

(3) 设置好扫描时间后，选中“DELAY”，逆时针转动旋钮，将伪随机二进制序列的起始点调出屏幕后，便可看到眼图。

(4) 再换用不同码率(8M、34M)观测，其中当码率为 34M 时，“图形”应设置为 2^{23}-1。

2) 确定噪声容限

按屏幕下方的“ΔV”键，再按屏幕右方最上面的“Vmarkers”打开处于“Chan 1”状态。按下“Marker 1 POSITION”对应键使其处于高亮，转动旋钮使光标移到如图 2-8.4 所示的眼图的上(下)眼皮内侧，电压值为 V_1。用同样方法使“Marker 2 POSITION”光标处于上(下)眼皮外侧，电压值为 V_2。在波形下方会自动显示出 V_1、V_2，记录下其值。由式(2-8.1)求出噪声容限。

3) 时间抖动测试

按屏幕下方的“ΔT”键，再按屏幕右方最上面的“Tmarkers”使其处于“Chan 1”，用类似步骤 2)的方法调节“START MARKER”和“STOP MARKER”使两时间基线处于如图 2-8.4 所示的 ΔT 处，读出 ΔT 值。再用同样方法测出图 2-8.4 中的 T_b 值。由式(2-8.2)求出定时抖动。

4) 上升、下降时间的测量

再次使用“ΔV”键，按屏幕右下方的“Auto Top-Base”，再按屏幕右方的自动放置 V 光标的键：无论光标在何处，如果“0～100%”键被按下，光标将立即移到波形的 0%和

100%处，再按一次，功能菜单将移到“10%～90%”处，同样，将光标移到“20%～80%”之后，按下“ΔT”键，分别移动两条时间轴光标到电压线与波形相交处，读出此时的ΔT，即为上升时间，再由式(2-8.3)求出 $T_{10\text{-}90}$，同样方法可以求出下降时间。

六、实验数据与分析

将测试结果记录到表 2-8.1 中，并计算噪声容限和定时抖动。

表 2-8.1 实验数据记录

参数 \ 速率		8M
V_1/mV		
V_2/mV		
T_b/ns		
ΔT/ns		
上升时间	$T_{20\text{-}80}$/ns	
	$T_{10\text{-}90}$/ns	
下降时间	$T_{20\text{-}80}$/ns	
	$T_{10\text{-}90}$/ns	
噪声容限		
定时抖动		

七、思考题

(1) 分析如果光纤总色散变大，眼图将如何变化。

(2) 分析如果传输速率变大，眼图将如何变化。

实验 9
光波分复用系统的特性测量

一、实验目的

(1) 掌握波分复用技术概念。
(2) 掌握光波分复用器的原理和特性。
(3) 了解光波分复用传输系统的工作原理和系统组成。

二、实验内容

(1) 测量光波分复用器的特性。
(2) 设计和搭建双波分复用系统。
(3) 测量波分复用系统的误码率和眼图特性。

三、实验原理

(一) 光波分复用技术

光纤通信对传输容量的追求是光纤通信技术发展的原动力。光波具有最高的频率，利用光载波作为信息载体进行通信，具有巨大的可用带宽。但是，实际的光波系统中由于受到光纤色散和电子线路的限制，单路光信道的速率一般只能达到 10Gbps，商用最高可以达到 40Gbps，通信速率受到限制。因此，为了充分利用光纤的频带资源，提高传输容量，提出了光复用技术。

光复用技术主要包括光时分复用技术、光码分复用技术和光波分复用技术。

光时分复用(Optical Time Division Multiplexing，OTDM)技术将通信时间分成若干时隙，某一固定信道占用某一固定时隙，这样各信道按照一定的时间顺序进行传输。这种技术绕过了产生高比特流的电子障碍，逾越了电子学限制，产生高速比特流，但是以单个光波长承载 TDM 比特流，仍属单信道系统。光时分复用要求光脉冲宽度需要至少为皮秒或亚皮秒，目前仍然没有性价比较高、易于光纤通信应用的成熟技术方案。同时，光纤的色散是对超短脉冲传输的巨大限制，即便采用低色散光纤或色散补偿技术也难于承担皮秒量级光脉冲的长距离传输，限制了 OTDM 技术的应用。

光码分复用(Optical Code Division Multiplexing，OCDM)技术中，每个用户都拥有一个唯一的地址码，这个地址码是一组光正交码中的一个，不同的用户采用不同的相互正交的地址码。在进行数据信息的传输时，首先用特定的地址码数据信息进行光调制，传输后在接收端使用与发射端相同的地址码进行光解调。OCDM 充分发挥了光纤信道宽带的特点，

具有保密性强、多址接入、动态分配带宽和地址等优点，适用于保密要求高，多用户接入的光纤通信系统。但是这种技术以带宽的低效利用为代价，当信号码率较高时更为不利。

光波分复用(Wavelength Division Multiplexing，WDM)技术将两种或多种各自携带有大量信息的不同波长的光载波信号，在发射端经复用器汇合，耦合进同一根光纤中进行传输。在接收端，通过解复用器对各波长的信号进行分离，由光接收机做进一步的处理，恢复原信号。光波分复用技术是目前最为成功、应用最为广泛的光信号复用技术。

波分复用(WDM)可以分为两大类，高端大容量的密集波分复用(DWDM)系统和高性价比的粗波分复用(CWDM)系统。

1. 粗波分复用

粗波分复用(CWDM)的基本特点是工作波长覆盖 1270～1610nm 波段，波长间隔为 20nm 以上，ITU-T 的 G694.2 标准定义了 16 个信道。由于 CWDM 波长间隔较大，对半导体激光器(LD)的波长稳定性和线宽的要求较低，同时对波分复用器的性能要求也较低，因此该系统的成本较低，性价比较高。可见，CWDM 系统适合应用于容量较小的城域网或局域网光纤通信系统以及光纤接入网。

2. 密集波分复用

密集波分复用(DWDM)的基本特点是工作波长覆盖 1480～1620nm 波段，ITU-T 的 G.692 定义了波长间隔为 50GHz 和 100GHz 的标准，中心波长为 1552.52nm(频率为 193.1THz)向长波长和短波长延伸，又分别定义了 C(Center)波段 1530～1560nm，L(large)波段 1560～1620nm 和 S(Short)波段 1480～1530nm。100GHz 的间隔在 C 波段即可容纳 40 个波长信道，可以获得较大的通信容量。因此，DWDM 是解决大容量传输的最佳技术手段，在光纤骨干网的运用中得到了充分发挥。

光波分复用技术在不过多提高单一波长传输速率的情况下，通过增加复用波长数在一根光纤里传输，达到在一根光纤物理信道中传输超大容量的目标，解决了光纤通信对容量的新要求。这种技术具有带宽资源巨大、组网灵活、传输与应用的经济性高等显著优势，是目前最重要的一种复用技术。

(二) 光波分复用器

波分复用器件是波分复用通信系统的核心光学器件，属于波长选择性耦合器，是用来合成不同波长的光信号或者分离不同波长的光信号的无源器件，前者称为“复用器”或“合波器”，后者称为“解复用器”或“分波器”。对于单根光纤而言，光波分复用器具有对 n 个波长信号进行选择的功能。由于 n 个波长信号通过单根光纤传输，那么合波器/分波器具有 n+1 个端口。对于合波器，其中 1 个端口作为波分复用器的输出，另外 n 个端口作为波分复用器的输入端。反之即为分波器。

1. 光波分复用器原理

光波分复用/解复用器的耦合原理与一般耦合器类似。以 2×2 的光波分复用/解复用器为例，原理如图 2-9.1 所示。在式(2-5.2)中，由于耦合系数 C 与波长有关，假设特定波长为 λ_1 和 λ_2，选择光纤参数，调整耦合区长度，可以使得波长为 λ_1 的光信号在光纤 a 的输出最大而在光纤 b 的输出为 0，同时波长为 λ_2 的光信号在光纤 a 的输出为 0 而在光纤 b 的输



76768 出最大。这样实现了波分解复用，反向就构成了波分复用器。

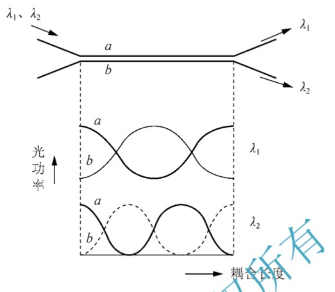


图 2-9.1　光纤波分复用解复用器原理

2. 光波分复用器的特性参数

波分复用器的特性参数主要有 3 项。这里以 1×2 的光波分复用器为例，结构如图 2-9.2 所示。端口 1 为输入端口，端口 2 和 3 为输出端口。

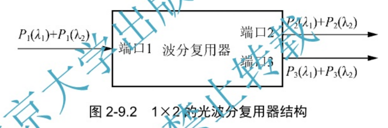


图 2-9.2　1×2 的光波分复用器结构

1) 插入损耗

插入损耗定义为特定波长信号通过波分复用器的相应通道时所引入的功率损耗。对于上图的光波分复用器，λ_1 的插入损耗应为

$$L_{\lambda_1} = -10\lg\frac{P_2(\lambda_1)}{P_1(\lambda_1)} \tag{2-9.1}$$

2) 隔离度

波分复用波长隔离度或者通道间隔离度定义为在某一指定波长输出端口所测得的另一非选择波长的功率与该波长输入功率之比的对数。对于图 2-9.2 的光波分复用器，λ_1 和 λ_2 通道的波长隔离度应为

$$\gamma_{\lambda_1} = -10\lg\frac{P_2(\lambda_2)}{P_1(\lambda_2)},\ \gamma_{\lambda_2} = -10\lg\frac{P_3(\lambda_1)}{P_1(\lambda_1)} \tag{2-9.2}$$

3) 中心波长和通道带宽

通道带宽定义为波分复用器分配给某指定光发送机的波长范围。通常根据波分复用光纤传输采用的 DWDM 或 CWDM 技术及其信道频率和间隔来设计中心波长和通道带宽。

3. 光波分复用器的种类

光波分复用器的种类很多，大致可以分为熔锥光纤型、介质膜干涉型、光栅型等。

1) 熔锥光纤型

利用第二篇实验 5 中所述的熔锥型光纤耦合器的波长依赖性，可以制作波分复用器件。制作方法类似于单模光纤耦合器，改变熔融拉锥工艺，使分光比随波长急剧变化。在图 2-5.2(b)中，通过设计熔融区的锥度，控制拉锥速度，使直通臂对波长 λ_1 的光有接近 100%的输出，而对于波长 λ_2 的光输出接近零；使耦合臂对波长 λ_2 的光有接近 100%的输出，而对于波长 λ_1 的光输出接近零。

2) 介质膜干涉型

介质膜干涉型采用多层介质膜作为干涉滤波器，使某一波长的光通过，而其他波长的光被阻止。干涉滤波器由多层不同材料(如 TiO_2 和 SiO_2)，不同折射率和不同厚度的介质膜按设计要求组合而成，每层厚度为 $\lambda/4$ (相当于 $\pi/2$ 相移)，因而经低折射率层反射的光经历 2π 相移，与经高折射率层的反射光同相叠加，这样在中心波长附近，各层反射光叠加，在滤波器输入端面形成很强的反射光。在偏离高反射波长两侧，反射光陡然降低，大部分光成为透射光。

一个 6 波长介质膜干涉型波分复用器如图 2-9.3 所示。当 $\lambda_1 \sim \lambda_6$ 的光信号从一根单模光纤输入时，波长 λ_1 的光首先通过带通滤波器输出，波长 $\lambda_2 \sim \lambda_6$ 的光反射，继而波长的 λ_2 光通过滤波器输出。以此类推，完成多波长解复用的目的。若改变传输方向，从输入端口分别输入 $\lambda_1 \sim \lambda_6$ 的光，在输出端口即可得到复用合光信号。

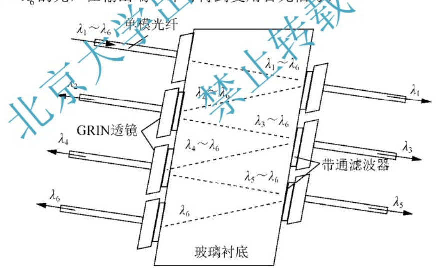


图 2-9.3　6 波长介质膜干涉型光波分复用器

这种波分复用器信道带宽平坦、插入损耗低、结构尺寸小、性能稳定、与偏振无关。但是各波长成分的插损差异较大，且分光的线宽相对较宽，一般限于 16 波以下的波分复用系统使用。

3) 光栅型

光栅型波分复用器的原理是：当含有多波长的光信号在通过光栅时产生衍射，不同波长成分的光信号将以不同的角度出射，从而实现分波。反之，将各个波长的光汇聚而合波。



光栅型波分复用器常见的有体形平面或曲面光栅、平面阵列波导光栅和光纤光栅等。

(1) 体形平面或曲面光栅型。

这种器件采用在 Si 衬底上沉积环氧树脂的方法制造，如图 2-9.4 所示。多波长信号经光纤输入和透镜聚焦在反射光栅上，反射光栅将各波长分开，然后经透镜将各个波长的光聚焦到各自的光纤，实现了多波长信号的分接。采用相反的过程，便可实现多波长复接。这种器件具有优良的波长选择特性，通道间隙小，光栅器件并联工作，插入损耗不随通路数增加，复用路数多，已达 120 路。但插入损耗较大，约 3～8dB，对偏振较敏感。

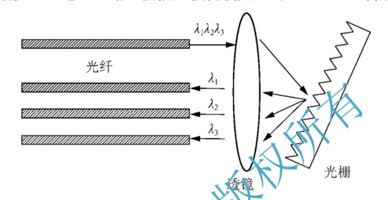


图 2-9.4　体光栅型光波分复用器结构示意图

(2) 平面阵列波导光栅型。

这种器件采用两个沉积于 Si 衬底上的平面星型光栅耦合器构成，如图 2-9.5 所示。星型耦合器的平面波导分别与输入和输出波导及阵列光栅(AWG)耦合。连接两平面波导的 AWG 由规则排列的波导组成，相邻波导的长度相差固定值，因而产生的相移随波长而改变，AWG 类似于凹面衍射光栅。对于在某指定输入端口输入的多波长信号，将被分解至不同的输出端口，实现多波长信号的分解。同理，也可实现复接。这类器件的波长间隔小、信道数多、通带平坦等优点，非常适合超高速、大容量的 WDM 系统使用，并已应用于 WDM 多信道系统中作为中继站的上下路波分复用器和光交换系统中作为新型多波长选择开关，是一种具有重要应用前景的新型 WDM。

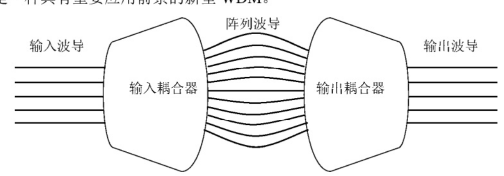


图 2-9.5　平面阵列波导光栅型光波分复用器结构示意图

(3) 光纤光栅型。

光纤光栅是用强光干涉谱照射一段时间后，使光纤线芯折射率分布呈周期变化而形成。由于光纤光栅有波长选择作用，因此可以用来作为波分复用器件。光纤光栅可分为传

输型的长周期光栅和反射型的短周期布拉格光栅。图 2-9.6 是由光环行器和布拉格光纤光栅构成的光波分复用器。这种器件往往结构较为复杂，实用性不强。

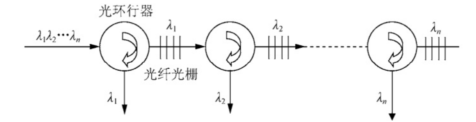


图 2-9.6 光纤光栅型光波分复用器结构示意图

(三) 光波分复用系统

最初的波分复用系统是由不同光纤通信窗口的中心波长复用，例如 1.31μm/1.55μm 的复用。目前，光纤通信已发展成为光纤通信长波长窗口内间隔 100GHz 或 200GHz 的几十个波长甚至上百个波长的复用。而光纤掺铒放大(EDFA)技术的兴起，使之与光波分复用技术结合建立起新一代的光纤通信系统。

在波分复用系统中，来自不同信道的数字或模拟信号调制到不同波长的光载波上，多个不同波长的光载波通过波分复用器耦合在一起，混合的多个波长信号通过一根光纤传输，并可由光放大器进行放大增加传输距离。在接收端，由波分复用器将多个光载波分开，分别送入不同的光接收机进行接收，解调得到模拟或数字信号，如图 2-9.7 所示。

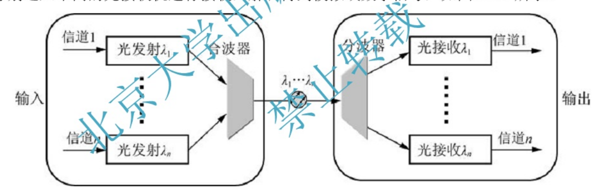


图 2-9.7 波分复用系统示意图

本实验采用 1.31μm/1.55μm 双波长复用，并具有单向传输和双向传输两种方式，每一波长信道内传输一个由误码测试仪产生的存在一定误码率的数字信号，经过波分复用系统传输(复用，传输，解复用)后由光接收机变换为电信号。经过光纤波分复用系统传输后的信号再与误码测试仪产生的信号进行比较。

本实验中所用 AV5232E/AV5233C 误码测试仪是可用于 1～2 次群(AV5233C 可用于 1～3 次群)的端对端测试，环回测试和直线测试的基本设备，AV5233C 的时钟频率包括 2MHz、8MHz 和 34MHz，AV5232E 的时钟频率包括 2M 和 8M，可以自行设置从 10^{-3}～10^{-6} 的误码率，可输出 AMI(交替传号反转码)，HDB3(3 阶高密度双极性码)，RZ(归零码)，NRZ(非归零码)4 种码型，并可输出 2^{15-1}，2^{23-1} 伪随机二进制序列。



1. 单向光纤波分复用传输系统

单向光纤波分复用传输系统如图 2-9.8 所示。误码测试仪的发射部分提供某一码型的伪随机二进制序列，其码速可以为 2MHz、8MHz 或 34MHz。将 AV5232E 产生的电信号加到波长为 1.31μm 的光源上，将 AV5233C 产生的电信号加到波长为 1.55μm 的光源上，分别进行强度调制，1.31μm 和 1.55μm 两路被强度调制的光信号同向输出后经波分复用器合波，通过单根光纤同向传输。在接收端 1.31μm 和 1.55μm 两路光信号经解波分复用器将两路光信号分开，分别送入到光接收机进行解调，恢复成电信号，最后传输到误码测试仪进行误码率的比较检测。

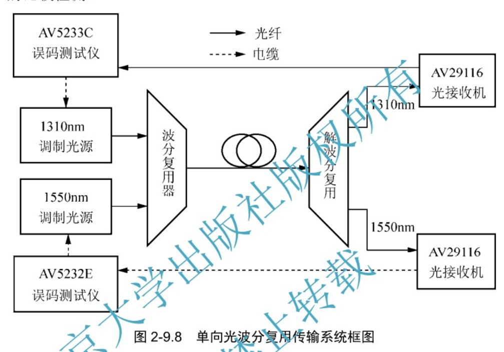


图 2-9.8　单向光波分复用传输系统框图

在数字光纤通信系统中，常用光信号的有无来表示“1”码和“0”码，而在本实验中，由误码仪输出的 AMI 码和 HDB3 码是以“1”码正负极性交替方式发送的三元码型，包含“1”、“0”、“−1”码，因此在光发射机中就需要有码型变换电路将电端机传来的码型变换成适合在光路中传输的码型，本实验中光发射机采用光强调制的办法，即用无光表示“−1”码，用 P_1(P_1是“0”码光脉冲的平均光功率)表示“0”码，用 P_2 表示“1”码。

2. 双向光纤波分复用传输系统

如图 2-9.9 所示，AV5232E 和 AV5233C 误码测试仪发射部分提供 AMI 或 HDB3 码，分别加到波长为 1310nm 和 1550nm 的光源上进行强度调制，两路光输出后沿相反方向传输，各自经过第一个波分复用/解复用器后，两路光开始在同一根光纤中反向传输，当各自经过第二个波分复用/解复用器后，分别将光信号送入光接收机，恢复成电信号，传输到误码仪进行误码的比较检测。

四、实验仪器设备

误码测试仪	1310nm 单模调制光源	1550nm 单模调制光源	光接收机
光功率计	1310nm/1550nm 波分复用器	示波器	光纤



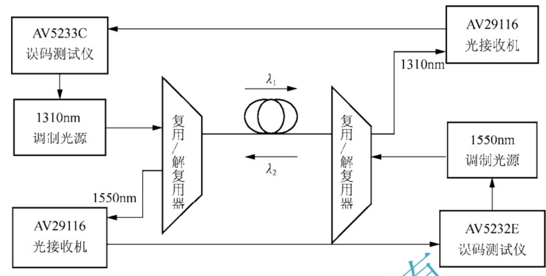


图 2-9.9　双向光波分复用传输系统框图

五、实验步骤

(1) 测量波分复用器的特性参数。

① 将 1310nm 和 1550nm 光源启动，并预热一段时间，达到稳定输出后，测出光源输出功率 P_1(1310) 和 P_1(1550)。

② 基于图 2-9.2，将 1310nm 光源与 1310nm/1550nm 波分复用器输入端口 1 连接，在 1310nm 输出端口测出 P_2(1310)，在 1550nm 输出端口测出 P_3(1310)。

③ 将 1550nm 光源与 1310nm/1550nm 波分复用器输入端口 1 连接，在 1310nm 输出端口测出 P_2(1550)，在 1550nm 输出端口测出 P_3(1550)。

④ 将数据填入表 2-9.1 中，计算波分复用器的插入损耗和隔离度。

(2) 按照图 2-9.10 所示，连接系统，搭建波分复用系统测试系统。

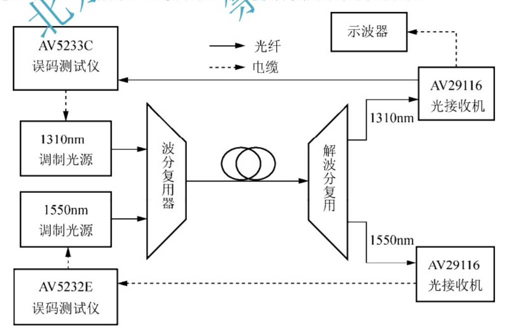


图 2-9.10　光波分复用系统特性测量原理图



(3) 按照第二篇实验 7 和实验 8 的步骤，测量波分复用系统的误码率和眼图特性，将数据填入表 2-9.2 和表 2-9.3 中，并进行计算。

六、实验数据与分析

将实验结果填入下列表格中。

表 2-9.1　光波分复用器数据处理表(1 端为输入端，2 端和 3 端为输出端)

输入 1310nm 光功率 $P_1(1310)$ /dBm	
输入 1550nm 光功率 $P_1(1550)$ /dBm	
1310nm 输出端光功率 $P_2(1310)$ /dBm	
1550nm 输出端光功率 $P_3(1310)$ /dBm	
1310nm 输出端光功率 $P_2(1550)$ /dBm	
1550nm 输出端光功率 $P_3(1550)$ /dBm	
1 端到 2 端的插入损耗 L_{1310} /dB	
1 端到 3 端的插入损耗 L_{1550} /dB	
波长隔离度 γ_{1310} /dB	
波长隔离度 γ_{1550} /dB	

表 2-9.2　WDM 传输系统误码表

时钟频率	插入误码率	EC	SER	ER	ES	ES%	SES	SES%
2MHz	0							
2MHz	10^{-3}							
2MHz	10^{-6}							

表 2-9.3　WDM 眼图测试表

参数 \ 速率		8M
V_1/mV		
V_2/mV		
T_b/ns		
Δ T/ns		
上升时间	$T_{20\text{-}80}$/ns	
	$T_{10\text{-}90}$/ns	
下降时间	$T_{20\text{-}80}$/ns	
	$T_{10\text{-}90}$/ns	
定时抖动		
噪声容限		

七、思考题

本实验测得的误码率和眼图结果与第二篇实验 7 和实验 8 的结果相比，有什么变化？原因是什么？

实验 10
掺铒光纤放大器结构设计与性能测试

一、实验目的

(1) 了解 EDFA 的基本结构和功能。
(2) 掌握 EDFA 各项参数的测试方法。

二、实验内容

(1) 设计 EDFA 结构方案，搭建 EDFA 并实现光放大。
(2) 测试 EDFA 的主要性能参数。

三、实验原理

光放大技术是 20 世纪光通信领域伟大发明之一，为实现超长距离、超大容量的光纤传输系统奠定了坚实基础。在光放大器实用化以前，为了克服光纤传输中的损耗，需要对光信号进行再生。采用的方法是将传输后的弱光信号先转换成电信号，经过放大和整形后，再去调制激光器，将电信号转换回光信号，这种中继方法称为光—电—光混合中继法。但是这种方法结构复杂、体积大、能耗大，随着传输码率的提高，尤其在多信道复用和双向复用光纤通信系统中，这种中继方式将变得十分复杂和昂贵。于是，中继部分成了限制信号传输容量扩大的瓶颈。而光纤放大器的出现解决了这一难题，它可以在光域内直接对光信号进行放大，逐步取代了传统的光—电—光的中继模式，成了新一代光纤通信系统中必不可少的关键器件。目前实用化的光放大器中主要有半导体激光放大器、掺杂光纤放大器和非线性光纤放大器。其中，掺铒光纤放大器已广泛应用于长距离、大容量、高速率的光纤通信系统、接入网、军用系统等多个领域。

1. 掺铒光纤放大器工作原理

掺杂光纤放大器利用在石英光纤中掺入稀土离子(如 Er^{3+}、Nd^{3+}、Tm^{3+}、Yb^{3+}等)作为增益介质，在泵浦光作用下将稀土原子的电子激励到较高激发态能级，形成粒子数反转，反转后的高能态例子在外界光场的诱使下，以光辐射的形式从高能级跃迁到基态，从而对入射光信号提供光增益。

掺杂光纤放大器的特性主要由掺杂元素决定。对于掺铒光纤放大器，则是由掺铒光纤中的铒离子(Er^{3+})的能级结构决定，如图 2-10.1 所示。

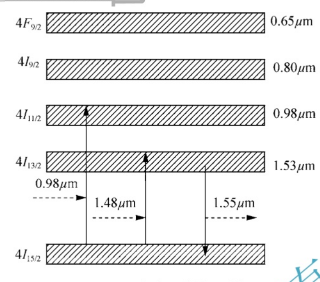


图 2-10.1　铒离子的能级结构图

铒离子有 3 种能级，分别是基态($4I_{15/2}$)、亚稳态($4I_{13/2}$)和激发态($4I_{11/2}$ 及以上能级)。当泵浦光的光子能量等于激发态和基态的能量差时，Er^{3+}吸收泵浦光能量从基态跃迁到激发态。激发态不稳定，Er^{3+}很快返回到亚稳态。如果泵浦光的光子能量等于亚稳态和基态的能量差时，Er^{3+}吸收泵浦光从基态跃迁到亚稳态。若输入的信号光的光子能量等于亚稳态和基态的能量差，则处于亚稳态的 Er^{3+}将跃迁到基态，产生受激辐射光，信号光得到放大。因此，EDFA 能对 1550nm 窗口的信号光进行放大。在泵浦方面，可以有 650nm、800nm、980nm 和 1480nm 等多种波长的泵浦形式。由于波长短于 980nm 的泵浦存在着较强的受激带吸收，泵浦效率低，所以通常人们采用 980nm 和 1480nm 两种泵浦波长。

2. EDFA 特性

1) 增益和增益谱宽

放大器的增益不仅与信号光的频率和强度有关，而且还与增益介质的特性紧密相关。对于均匀展宽二能级系统，增益系数 $g(\omega)$ 可以表示为

$$g(\omega)=\frac{g_0}{1+(\omega-\omega_0)^2T_2^2+P/P_s} \tag{2-10.1}$$

式中：g_0 为峰值增益由增益介质和泵浦强度决定；ω 为入射光信号的频率；ω_0 为增益介质的跃迁频率；P 为信号光功率；P_s 为饱和光功率，与介质的辐射寿命及辐射截面等参数有关；T_2 为横向弛豫时间。

对于小信号放大状态，即 $P=P_s$ 时，增益系数 $g(\omega)$ 为

$$g(\omega)=\frac{g_0}{1+(\omega-\omega_0)^2T_2^2} \tag{2-10.2}$$

式(2-10.2)表明此时增益按洛伦兹分布变化，当 $\omega=\omega_0$ 时，增益系数最大。增益谱宽定义为增益谱 $g(\omega)$ 的半极大值全宽(FWHM)。对于洛伦兹分布的增益谱，增益谱宽为

$$\Delta\omega_g=2/T_2 \quad 或 \quad \Delta\nu_g=\frac{\Delta\omega_g}{2\pi}=\frac{1}{\pi T_2} \tag{2-10.3}$$

光放大器的增益或放大倍数定义为



$$G = P_{out} / P_{in} \tag{2-10.4}$$

式中：P_{in} 和 P_{out} 分别为光放大器的输入与输出光功率。光放大器增益与其长度 L 和增益系数 $g(\omega)$ 呈指数关系，为

$$G(\omega) = \exp[g(\omega)L] \tag{2-10.5}$$

对于掺铒光纤放大器，其增益谱主要由 Er^{3+}的增益分布决定，但受到玻璃非晶结构和其他掺杂杂质(如 GeO_2、Al_2O_3)的影响。在光纤中，非晶结构会导致增益谱发生非均匀展宽，因此 EDFA 实际表现为综合展宽，图 2-10.2 为一个掺铒光纤放大器的增益谱。由图可知，EDFA 的增益谱很宽，为 1530～1560nm，约 30nm，在增益谱内具有两个峰值，增益谱比较平坦的部分是 1540～1560nm，几乎覆盖整个 1550nm 工作窗口。不同的 EDFA，由于掺杂参数不同，其增益谱会出现差异，可以通过对掺杂参数的调整得到合适的增益谱分布。而对于给定的掺杂参数，EDFA 的增益与放大器长度、光纤芯径、泵浦功率等诸多因素有关。

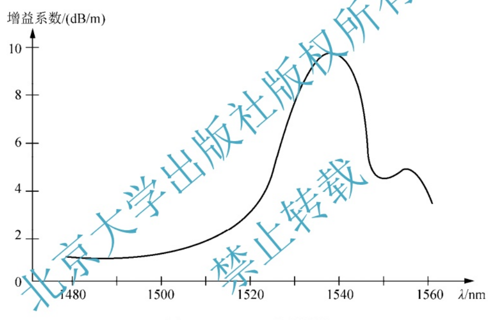


图 2-10.2　EDFA 的增益谱

2) 增益饱和与饱和输出光功率

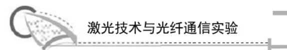
式(2-10.1)表明，增益系数的大小与信号光功率有关，在小信号放大状态，即 $P = P_s$ 时，信号光功率对增益谱基本没有影响，但随着信号光功率的增大，增益系数会随着信号光功率的增大而减小，这就是增益饱和现象。放大器增益为

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{G-1}{G} \cdot \frac{P_{out}}{P_s}\right) \tag{2-10.6}$$

式中：G_0 为小信号放大峰值增益。图 2-10.3 描述了增益对输入功率的依存关系。从曲线中可以看到，当输入信号光功率增加时，增益开始保持在小信号增益值附近，接着开始下降。在增益饱和区线性减小后，当输入功率很大时，增益趋于 0dB。

饱和输出光功率则定义为放大器增益从峰值增益下降 3dB 时的输出功率，有

$$P_{out}^{s} = \frac{G_0 \ln 2}{G_0 - 2} P_s \tag{2-10.7}$$



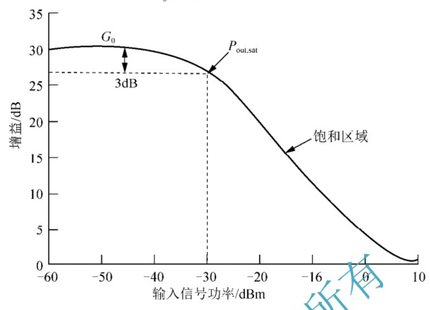


图 2-10.3　放大器增益随输入信号功率的变化

在一般情况下，$G_0 \gg 2$，所以饱和输出光功率一般为 P_s 的 70%。EDFA 的饱和输出功率依放大器的设计不同而不同，典型值为 10～20mW。对于大功率 EDFA 放大器，其饱和输出功率将达到 1～10W。

3) 噪声系数

当光放大器对光信号进行放大时，由于噪声的影响，光信号的信噪比 SNR 会下降，用光放大器的噪声系数 F 来表征这种影响的到小，定义为

$$F = \frac{(\mathrm{SNR})_{\mathrm{in}}}{(\mathrm{SNR})_{\mathrm{out}}} \tag{2-10.8}$$

为了方便计算，这里重点考虑白噪声的作用，输入信号的信噪比可表示为

$$(\mathrm{SNR})_{\mathrm{in}} = \frac{I^2}{\sigma_s^2} = \frac{(RP_{\mathrm{in}})^2}{2q(RP_{\mathrm{in}})\Delta f} = \frac{P_{\mathrm{in}}}{2h\nu\Delta f} \tag{2-10.9}$$

式中：$I = RP_{\mathrm{in}}$ 表示平均光电流；$R = q/h\nu$ 为理想探测器的响应度；$\sigma_s^2 = 2q(RP_{\mathrm{in}})\Delta f$ 为探测器的白噪声；Δf 为探测器的带宽。

输出信号的信噪比可表示为

$$(\mathrm{SNR})_{\mathrm{out}} = \frac{I^2}{\sigma_s^2} = \frac{(RGP_{\mathrm{in}})^2}{\sigma_s^2} \approx \frac{GP_{\mathrm{in}}}{4S_{\mathrm{sp}}\Delta f} \tag{2-10.10}$$

式中：S_{sp} 为噪声谱，可表示为

$$S_{\mathrm{sp}}(\nu) = (G-1)n_{\mathrm{sp}}h\nu \tag{2-10.11}$$

式中：n_{sp} 为自发辐射因子，对于二能级系统，为

$$n_{\mathrm{sp}} = N_2 \big/ (N_2 - N_1) \tag{2-10.12}$$

式中；N_1 和 N_2 分别为基态的受激态的粒子数浓度。当放大器实现粒子数完全反转时，$n_{\mathrm{sp}} = 1$，在非完全反转情况下，$n_{\mathrm{sp}} > 1$。



将式(2-10.9)和式(2-10.10)代入式(2-10.8)，可得到放大器的噪声系数为

$$F_{\mathrm{n}}=2n_{\mathrm{sp}}\frac{G-1}{G}\approx 2n_{\mathrm{sp}} \tag{2-10.13}$$

式(2-10.13)表明，即使是理想的光放大器，输入信号的 SNR 也被降低了 3dB，光放大器噪声系数的理想值为 3dB。

对于 EDFA 其噪声系数与放大器长度和泵浦光功率有关。在泵浦功率较大的情况下，EDFA 的噪声系数可以接近 3dB 的理论极限。一般，980nm 泵浦的 EDFA 具有较低的噪声系数，这是因为如前面所分析的 980nm 泵浦的 EDFA 为 3 能级系统，容易获得较高的反转数分布，而 1480nm 泵浦的 EDFA 由于泵浦能级与受激态能级处于同一能带，较难获得较高的反转数分布。

3. EDFA 结构

掺铒光纤放大器主要由掺铒光纤、泵浦光源、波分复用器和光隔离器等组成。掺铒光纤提供信号光的放大，泵浦光源提供泵浦光，光波分复用器实现信号光和泵浦光的合波，光隔离器隔离光路的反射信号。其具体结构有 3 种典型结构，即正向泵浦、反向泵浦和双向泵浦，分别如图 2-10.4(a)、(b)和(c)所示。一般来说，反向泵浦较正向泵浦具有更小的噪声系数。若需要光放大器具有较大的饱和输出功率或较高增益时，可采用双向泵浦的技术手段，如需更高功率的输出可采用多级级联放大的结构设计。

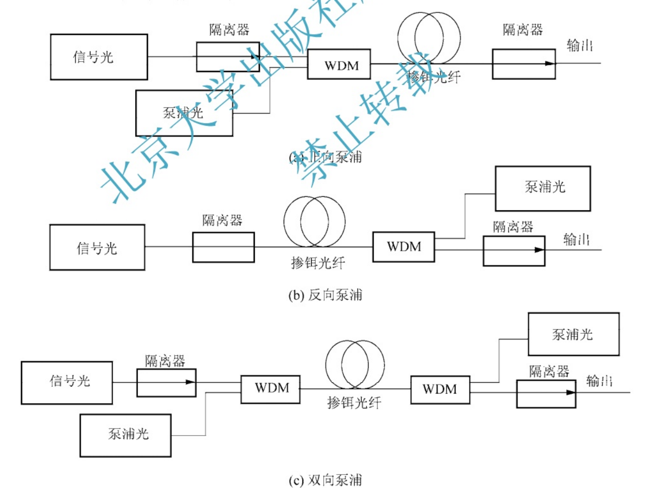


图 2-10.4　EDFA 的典型结构

4. EDFA 的特点及应用

EDFA 的技术特点有以下几点：全光纤化，应用方便，耦合效率高；带宽大，可覆盖 L(1560～1620nm)、C(1530～1560nm)和 S(1480～1530nm)波段；小信号增益高，可达 40dB；饱和输出功率高，可达到 10W；噪声低，可小于 4dB；成本较低，性价比高；多功能，能实现放大器在系统中的所有的应用类型。

光放大器在系统中有 3 种基本应用，并且不同的应用对光放大器有不同的要求。第一种应用是将光放大器作为在线放大器设置在光纤线路中，对衰减劣化的光信号进行放大，也称为线路放大器，要求有较高的增益。第二种应用是将光放大器直接连接到光发射机的光输出端口，提高光发射机的发送功率，增加传输距离，称为功率放大器，要求具有高的饱和输出功率。第三种应用则将光放大器放置在光接收机之前，提高系统接收灵敏度，增加传输距离，称为前置放大器，要求具有低的噪声系数。

当 EDFA 用作前置放大器、线路放大器和功率放大器时，其典型参数见表 2-10.1。

表 2-10.1　EDFA 的典型参数

项目	技术参数		
放大器应用类型	前置放大器	线路放大器	功率放大器
工作波长范围/nm	1530～1560		
输入光功率范围/dBm	−40～−10	−25～−3	−6～3
输出光功率范围/dBm	−5～20	13～23	33
放大器增益/dB	30～35	30～40	30～36
噪声系数/dB	≤4.3	5～6	5～6
偏振灵敏度/dB	≤0.3		
输入/输出光隔离度/dB	>30		
输入/输出光回波损耗/dB	>45		

四、实验仪器设备

掺铒光纤(不同长度)　　可调 980nmDFB 光源　　可调 1480nm DFB 光源
可调 1550nm DFB 光源　　波分复用器　　光隔离器
光功率计　　光谱仪　　光纤跳线

五、实验步骤

(1) 设计 EDFA 的结构。EDFA 的典型结构有正向、反向和双向三种，泵浦源有 980nm 和 1480nm 两种，可以设计不同的 EDFA 结构方案，并画出实验装置结构图。

(2) 按照设计的实验装置结构图，选择设备和器件搭建 EDFA。

(3) 测量 EDFA 的增益特性。

① 测量 ASE 功率。在 EDFA 的结构方案中，不接入 1550nm 信号光，用光功率计测试不同泵浦功率 P_p 下的 EDFA 输出功率即噪声功率 P_{ASE} 并记录数据，填入表 2-10.2 中。

② 泵浦功率 P_p 不变，测量不同输入信号功率 P_{in} 时 EDFA 的输出功率 P_{out}，将数据记



录到表 2-10.3 中，并基于前一步骤的数据，计算不同信号功率 P_{in} 对应的增益。

③ 改变泵浦功率 P_p 值，用与步骤②相同的方法，测量一次增益与信号功率的关系，填入表 2-10.3 中。

④ 选定几个固定的信号功率，测量不同泵浦功率下 EDFA 的输出功率，并计算相应的增益，填入表 2-10.2 中。

⑤ 测量饱和输出功率。基于饱和输出功率的定义和以上步骤测量的数据，计算饱和输出功率。

六、实验数据与分析

(1) 将实验数据记录到表 2-10.2 和表 2-10.3 中，并进行计算。

表 2-10.2　增益与泵浦功率的关系

泵浦功率 P_p /dBm	噪声功率 P_{ASE} /dBm	信号功率 P_{in} =　dBm		信号功率 P_{in} =　dBm		信号功率 P_{in} =　dBm	
		输出 P_{out}	增益 G	输出 P_{out}	增益 G	输出 P_{out}	增益 G

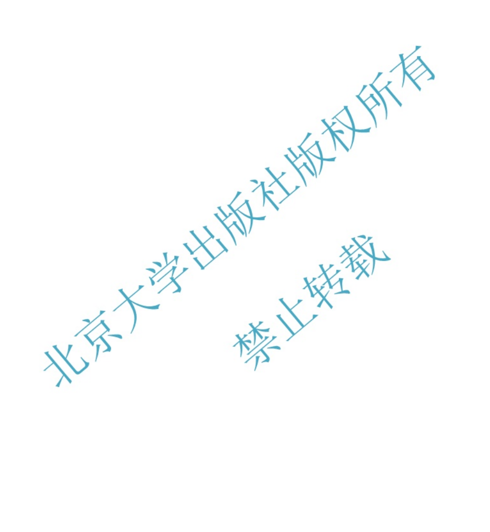
表 2-10.3　增益与信号功率的关系(泵浦功率 P_p =　dBm)

泵浦功率 P_p =　dBm 噪声功率 P_{ASE} =　dBm			泵浦功率 P_p =　dBm 噪声功率 P_{ASE} =　dBm		
信号功率 P_{in}	输出功率 P_{out}	增益 G	信号功率 P_{in}	输出功率 P_{out}	增益 G

(2) 绘制增益与泵浦功率的关系曲线，分析其变化趋势。
(3) 绘制增益与信号功率的关系曲线，分析其变化趋势。
(4) 计算饱和输出功率。

七、思考题

(1) 阐述掺铒光纤放大器和激光器的原理和区别。
(2) 如果没有隔离器，会出现什么情况？
(3) 实验中有什么需要改进的地方？



北京大学出版社本科电气信息系列实用规划教材

序号	书名	书号	编著者	定价	出版年份	教辅及获奖情况
			物联网工程			
1	物联网概论	7-301-23473-0	王　平	38	2014	电子课件/答案，有“多媒体移动交互式教材”
2	物联网概论	7-301-21439-8	王金甫	42	2012	电子课件/答案
3	现代通信网络	7-301-24557-6	胡珺珺	38	2014	电子课件/答案
4	物联网安全	7-301-24153-0	王金甫	43	2014	电子课件/答案
5	通信网络基础	7-301-23983-4	王昊	32	2014	
6	无线通信原理	7-301-23705-2	许晓丽	42	2014	电子课件/答案
7	家居物联网技术开发与实践	7-301-22385-7	付　蔚	39	2013	电子课件/答案
8	物联网技术案例教程	7-301-22436-6	崔逊学	40	2013	电子课件
9	传感器技术及应用电路项目化教程	7-301-22110-5	钱裕禄	30	2013	电子课件/视频素材，宁波市教学成果奖
10	网络工程与管理	7-301-20763-5	谢　慧	39	2012	电子课件/答案
11	电磁场与电磁波(第 2 版)	7-301-20508-2	邬春明	32	2012	电子课件/答案
12	现代交换技术(第 2 版)	7-301-18889-7	姚　军	36	2013	电子课件/习题答案
13	传感器基础(第 2 版)	7-301-19174-3	赵玉刚	32	2013	
14	物联网基础与应用	7-301-16598-0	李蔚田	44	2012	电子课件
15	通信技术实用教程	7-301-25386-1	谢　慧	36	2015	电子课件/习题答案
16	物联网工程应用与实践	7-301-1985[illegible]-7	于继明	39	2015	
			单片机与嵌入式			
1	嵌入式 ARM 系统原理与实例开发(第 2 版)	7-301-16870-7	杨宗德	32	2011	电子课件/素材
2	ARM 嵌入式系统基础与开发教程	7-301-17318-3	丁文龙　李志军	36	2010	电子课件/习题答案
3	嵌入式系统设计及应用	7-301-19451-5	邢吉生	44	2011	电子课件/实验程序素材
4	嵌入式系统开发基础——基于八位单片机的 C 语言程序设计	7-301-17468-5	侯殿有	49	2012	电子课件/答案/素材
5	嵌入式系统基础实践教程	7-301-22447-2	韩　磊	35	2013	电子课件
6	单片机原理与接口技术	7-301-19175-0	李　升	46	2011	电子课件/习题答案
7	单片机系统设计与实例开发(MSP430)	7-301-21672-9	顾　涛	44	2013	电子课件/答案
8	单片机原理与应用技术	7-301-10760-7	魏立峰　王宝兴	25	2009	电子课件
9	单片机原理及应用教程(第 2 版)	7-301-22437-3	范立南	43	2013	电子课件/习题答案，辽宁“十二五”教材
10	单片机原理与应用及 C51 程序设计	7-301-13676-8	唐　颖	30	2011	电子课件
11	单片机原理与应用及其实验指导书	7-301-21058-1	邵发森	44	2012	电子课件/答案/素材
12	MCS-51 单片机原理及应用	7-301-22882-1	黄翠翠	34	2013	电子课件/程序代码
			物理、能源、微电子			
1	物理光学理论与应用(第 2 版)	7-301-26024-1	宋贵才	46	2015	电子课件/习题答案，“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
2	现代光学	7-301-23639-0	宋贵才	36	2014	电子课件/答案
3	平板显示技术基础	7-301-22111-2	王丽娟	52	2013	电子课件/答案
4	集成电路版图设计	7-301-21235-6	陆学斌	32	2012	电子课件/习题答案
5	新能源与分布式发电技术	7-301-17677-1	朱永强	32	2010	电子课件/习题答案，北京市精品教材，北京市“十二五”教材
6	太阳能电池原理与应用	7-301-18672-5	靳瑞敏	25	2011	电子课件

序号	书名	书号	编著者	定价	出版年份	教辅及获奖情况
7	新能源照明技术	7-301-23123-4	李姿景	33	2013	电子课件/答案
			基　础　课			
1	电工与电子技术(上册) (第 2 版)	7-301-19183-5	吴舒辞	30	2011	电子课件/习题答案，湖南省“十二五”教材
2	电工与电子技术(下册) (第 2 版)	7-301-19229-0	徐卓农　李士军	32	2011	电子课件/习题答案，湖南省“十二五”教材
3	电路分析	7-301-12179-5	王艳红　蒋学华	38	2010	电子课件，山东省第二届优秀教材奖
4	模拟电子技术实验教程	7-301-13121-3	谭海曙	24	2010	电子课件
5	运筹学(第 2 版)	7-301-18860-6	吴亚丽　张俊敏	28	2011	电子课件/习题答案
6	电路与模拟电子技术	7-301-04595-4	张绪光　刘在娥	35	2009	电子课件/习题答案
7	微机原理及接口技术	7-301-16931-5	肖洪兵	32	2010	电子课件/习题答案
8	数字电子技术	7-301-16932-2	刘金华	30	2010	电子课件/习题答案
9	微机原理及接口技术实验指导书	7-301-17614-6	李干林　李　升	22	2010	课件(实验报告)
10	模拟电子技术	7-301-17700-6	张绪光　刘在娥	36	2010	电子课件/习题答案
11	电工技术	7-301-18493-6	张　莉　张绪光	26	2011	电子课件/习题答案，山东省“十二五”教材
12	电路分析基础	7-301-20505-1	吴舒辞	38	2012	电子课件/习题答案
13	模拟电子线路	7-301-20725-3	宋树祥	38	2012	电子课件/习题答案
14	数字电子技术	7-301-21304-9	秦长海　张天鹏	49	2013	电子课件/答案，河南省“十二五”教材
15	模拟电子与数字逻辑	7-301-21450-3	邬春明	39	2012	电子课件
16	电路与模拟电子技术实验指导书	7-301-20351-4	唐　颖	26	2012	部分课件
17	电子电路基础实验与课程设计	7-301-22474-8	武　林	36	2013	部分课件
18	电文化——电气信息学科概论	7-301-22484-7	高　心	30	2013	
19	实用数字电子技术	7-301-22598-1	钱裕禄	30	2013	电子课件/答案/其他素材
20	模拟电子技术学习指导及习题精选	7-301-23124-1	姚娅川	30	2013	电子课件
21	电工电子基础实验及综合设计指导	7-301-23221-7	盛桂珍	32	2013	
22	电子技术实验教程	7-301-23736-6	司朝良	33	2014	
23	电工技术	7-301-24181-3	赵莹	46	2014	电子课件/习题答案
24	电子技术实验教程	7-301-24449-4	马秋明	26	2014	
25	微控制器原理及应用	7-301-24812-6	丁筱玲	42	2014	
26	模拟电子技术基础学习指导与习题分析	7-301-25507-0	李大军　唐　颖	32	2015	电子课件/习题答案
27	电工学实验教程（第 2 版）	7-301-25343-4	王士军　张绪光	27	2015	
28	微机原理及接口技术	7-301-26063-0	李干林	42	2015	电子课件/习题答案
29	简明电路分析	7-301-26062-3	姜　涛	48	2015	电子课件/习题答案
			电子、通信			
1	DSP 技术及应用	7-301-10759-1	吴冬梅　张玉杰	26	2011	电子课件，中国大学出版社图书奖首届优秀教材奖一等奖
2	电子工艺实习	7-301-10699-0	周春阳	19	2010	电子课件
3	电子工艺学教程	7-301-10744-7	张立毅　王华奎	32	2010	电子课件，中国大学出版社图书奖首届优秀教材奖一等奖
4	信号与系统	7-301-10761-4	华　容　隋晓红	33	2011	电子课件
5	信息与通信工程专业英语(第 2 版)	7-301-19318-1	韩定定　李明明	32	2012	电子课件/参考译文，中国电子教育学会 2012 年全国电子信息类优秀教材
6	高频电子线路(第 2 版)	7-301-16520-1	宋树祥　周冬梅	35	2009	电子课件/习题答案

序号	书名	书号	编著者	定价	出版年份	教辅及获奖情况
7	MATLAB 基础及其应用教程	7-301-11442-1	周开利　邓春晖	24	2011	电子课件
8	计算机网络	7-301-11508-4	郭银景　孙红雨	31	2009	电子课件
9	通信原理	7-301-12178-8	隋晓红　钟晓玲	32	2007	电子课件
10	数字图像处理	7-301-12176-4	曹茂永	23	2007	电子课件，“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
11	移动通信	7-301-11502-2	郭俊强　李　成	22	2010	电子课件
12	生物医学数据分析及其 MATLAB 实现	7-301-14472-5	尚志刚　张建华	25	2009	电子课件/习题答案/素材
13	信号处理 MATLAB 实验教程	7-301-15168-6	李　杰　张　猛	20	2009	实验素材
14	通信网的信令系统	7-301-15786-2	张云麟	24	2009	电子课件
15	数字信号处理	7-301-16076-3	王震宇　张培珍	32	2010	电子课件/答案/素材
16	光纤通信	7-301-12379-9	卢志茂　冯进玫	28	2010	电子课件/习题答案
17	离散信息论基础	7-301-17382-4	范九伦　谢　勰	25	2010	电子课件/习题答案
18	光纤通信	7-301-17683-2	李丽君　徐文云	26	2010	电子课件/习题答案
19	数字信号处理	7-301-17986-4	王玉德	32	2010	电子课件/答案/素材
20	电子线路 CAD	7-301-18285-7	周荣富　曾　技	41	2011	电子课件
21	MATLAB 基础及应用	7-301-16739-7	李国朝	39	2011	电子课件/答案/素材
22	信息论与编码	7-301-18352-6	隋晓红　王艳营	24	2011	电子课件/习题答案
23	现代电子系统设计教程	7-301-18496-7	宋晓梅	36	2011	电子课件/习题答案
24	移动通信	7-301-19320-4	刘维超　时　颖	39	2011	电子课件/习题答案
25	电子信息类专业 MATLAB 实验教程	7-301-19452-2	李明明	42	2011	电子课件/习题答案
26	信号与系统	7-301-20340-8	李云红	29	2012	电子课件
27	数字图像处理	7-301-20339-2	李云红	36	2012	电子课件
28	编码调制技术	7-301-20506-8	黄　平	26	2012	电子课件
29	Mathcad 在信号与系统中的应用	7-301-20918-9	郭仁春	30	2012	
30	MATLAB 基础与应用教程	7-301-21247-9	王月明	32	2013	电子课件/答案
31	电子信息与通信工程专业英语	7-301-21688-0	孙桂芝	36	2012	电子课件
32	微波技术基础及其应用	7-301-21849-5	李泽民	49	2013	电子课件/习题答案/补充材料等
33	图像处理算法及应用	7-301-21607-1	李文书	48	2012	电子课件
34	网络系统分析与设计	7-301-20644-7	严承华	39	2012	电子课件
35	DSP 技术及应用	7-301-22109-9	董　胜	39	2013	电子课件/答案
36	通信原理实验与课程设计	7-301-22528-8	邬春明	34	2015	电子课件
37	信号与系统	7-301-22582-0	许丽佳	38	2013	电子课件/答案
38	信号与线性系统	7-301-22776-3	朱明早	33	2013	电子课件/答案
39	信号分析与处理	7-301-22919-4	李会容	39	2013	电子课件/答案
40	MATLAB 基础及实验教程	7-301-23022-0	杨成慧	36	2013	电子课件/答案
41	DSP 技术与应用基础(第 2 版)	7-301-24777-8	俞一彪	45	2015	
42	EDA 技术及数字系统的应用	7-301-23877-6	包　明	55	2015	
43	算法设计、分析与应用教程	7-301-24352-7	李文书	49	2014	
44	Android 开发工程师案例教程	7-301-24469-2	倪红军	48	2014	
45	ERP 原理及应用	7-301-23735-9	朱宝慧	43	2014	电子课件/答案
46	综合电子系统设计与实践	7-301-25509-4	武　林　陈　希	32(估)	2015	
47	高频电子技术	7-301-25508-7	赵玉刚	29	2015	电子课件
48	信息与通信专业英语	7-301-25506-3	刘小佳	29	2015	电子课件
49	信号与系统	7-301-25984-9	张建奇	45	2015	电子课件
50	数字图像处理及应用	7-301-26112-5	张培珍	36	2015	电子课件/习题答案
51	激光技术与光纤通信实验	7-301-26609-0	周建华　兰　岚	28	2015	

序号	书名	书号	编著者	定价	出版年份	教辅及获奖情况
自动化、电气						
1	自动控制原理	7-301-22386-4	佟　威	30	2013	电子课件/答案
2	自动控制原理	7-301-22936-1	邢春芳	39	2013	
3	自动控制原理	7-301-22448-9	谭功全	44	2013	
4	自动控制原理	7-301-22112-9	许丽佳	30	2015	
5	自动控制原理	7-301-16933-9	丁　红　李学军	32	2010	电子课件/答案/素材
6	现代控制理论基础	7-301-10512-2	侯媛彬等	20	2010	电子课件/素材，国家级“十一五”规划教材
7	计算机控制系统(第 2 版)	7-301-23271-2	徐文尚	48	2013	电子课件/答案
8	电力系统继电保护(第 2 版)	7-301-21366-7	马永翔	42	2013	电子课件/习题答案
9	电气控制技术(第 2 版)	7-301-24933-8	韩顺杰　吕树清	28	2014	电子课件
10	自动化专业英语(第 2 版)	7-301-25091-4	李国厚　王春阳	46	2014	电子课件/参考译文
11	电力电子技术及应用	7-301-13577-8	张润和	38	2008	电子课件
12	高电压技术	7-301-14461-9	马永翔	28	2009	电子课件/习题答案
13	电力系统分析	7-301-14460-2	曹　娜	35	2009	
14	综合布线系统基础教程	7-301-14994-2	吴达金	24	2009	电子课件
15	PLC 原理及应用	7-301-17797-6	缪志农　郭新年	26	2010	电子课件
16	集散控制系统	7-301-18131-7	周荣富　陶文英	36	2011	电子课件/习题答案
17	控制电机与特种电机及其控制系统	7-301-18260-4	孙冠群　于少娟	42	2011	电子课件/习题答案
18	电气信息类专业英语	7-301-19447-8	缪志农	40	2011	电子课件/习题答案
19	综合布线系统管理教程	7-301-16598-0	吴达金	39	2012	电子课件
20	供配电技术	7-301-16367-2	王玉华	49	2012	电子课件/习题答案
21	PLC 技术与应用(西门子版)	7-301-22529-5	丁金婷	32	2013	电子课件
22	电机、拖动与控制	7-301-22872-2	万芳瑛	34	2013	电子课件/答案
23	电气信息工程专业英语	7-301-22920-0	余兴波	26	2013	电子课件/译文
24	集散控制系统(第 2 版)	7-301-23081-7	刘翠玲	36	2013	电子课件，2014 年中国电子教育学会“全国电子信息类优秀教材”一等奖
25	工控组态软件及应用	7-301-23754-0	何坚强	49	2014	电子课件/答案
26	发电厂变电所电气部分(第 2 版)	7-301-23674-1	马永翔	48	2014	电子课件/答案
27	自动控制原理实验教程	7-301-25471-4	丁　红　贾玉瑛	29	2015	
28	自动控制原理（第 2 版）	7-301-25510-0	袁德成	35	2015	电子课件，辽宁省“十二五”教材
29	电机与电力电子技术	7-301-25736-4	孙冠群	45	2015	电子课件/答案

如您需要更多教学资源如电子课件、电子样章、习题答案等，请登录北京大学出版社第六事业部官网 www.pup6.cn 搜索下载。

如您需要浏览更多专业教材，请扫下面的二维码，关注北京大学出版社第六事业部官方微信（微信号：pup6book），随时查询专业教材、浏览教材目录、内容简介等信息，并可在线申请纸质样书用于教学。



感谢您使用我们的教材，欢迎您随时与我们联系，我们将及时做好全方位的服务。联系方式：010-62750667，szheng_pup6@163.com，pup_6@163.com，lihu80@163.com，欢迎来电来信。客户服务 QQ 号：1292552107，欢迎随时咨询。